

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS, ENGENHARIAS E
TECNOLOGIAS - UNACET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

JULIANA ACORDI

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PRODUTOS
CIMENTÍCIOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE MADEIRA:
CINZA VOLANTE E CINZA DE GRELHA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo

Coorientador: Prof. Dr. Fabiano Raupp-Pereira

**CRICIÚMA
2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

A185d Acordi, Juliana.

Desenvolvimento e caracterização de produtos
cimentícios a partir de resíduos de madeira : cinza volante e
cinza de grelha / Juliana Acordi, - 2017.

83 p: il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul
Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais, Criciúma, SC, 2017.

1, Argamassas. 2. Material cimentício suplementar. 3.
Pozolanas. 4. Cimento Portland. 5. Cinzas de biomassa. 6.
Cinzas de madeira. I. Título.

CDD. 22ª ed. 620.135

Bibliotecária Rosângela Westrupp – CRB 14º/364

Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

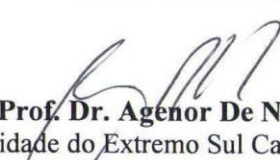
Juliana Acordi Monsani

Desenvolvimento e caracterização de produtos cimentícios a partir de resíduos de madeira: cinza volante e cinza de grelha.

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 31 de março de 2017.

Banca Examinadora:



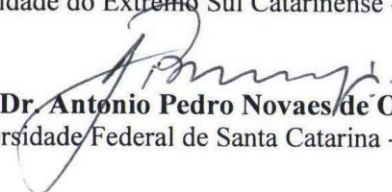
Prof. Dr. Agenor De Noni Junior

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Felipe Fardin Grillo

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Antonio Pedro Novaes de Oliveira

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

A minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde do corpo e do espírito.

Ao PROSUP – CAPES pelo auxílio financeiro e à UNESC pela estrutura disponibilizada durante o curso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo pela oportunidade, confiança e incentivo.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Fabiano Raupp-Pereira pelo otimismo e conhecimento transmitido.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM/ UNESC, em especial ao prof. Dr. Agenor de Noni Junior por disponibilizar seu laboratório e funcionários para vários ensaios desta pesquisa.

À Vivian, secretária do PPGCEM pelas valiosas e esclarecedoras informações.

Aos meus colegas e amigos de laboratório, em especial Débora, André e Cristian por auxiliarem de alguma forma em tantos momentos.

“É graça divina começar bem.
Graça maior é persistir na
caminhada certa. Mas a graça das
graças é não desistir nunca”.

(Dom Helder Câmara)

RESUMO

Pozolanas, escória, fillers ou materiais cimentícios suplementares (SCM), incorporados aos cimentos podem aumentar resistência mecânica ou diversificar características de uso. Cinzas de biomassa como da casca de arroz, bagaço de cana de açúcar, resíduos do dendezeiro e de madeira, são alguns exemplos de potenciais adições em ligantes hidráulicos à base de cimento Portland. As características dos materiais empregados influenciam na resistência mecânica e durabilidade do produto final. Este trabalho apresenta resultados da caracterização de cinzas volantes de madeira (finas) e cinzas de grelha (grossas), com o objetivo de substituir, respectivamente, o cimento na forma de SCM, e o agregado miúdo de argamassas e de concretos hidráulicos. Análises químicas mostraram a presença majoritária de SiO_2 e análises de difratometria de raios X evidenciaram fases amorfas nas cinzas volantes. Ensaio de atividade pozolânica – IAP à cal e índice de desempenho com cimento Portland, comprovaram a reatividade de algumas cinzas com o hidróxido de cálcio, porém resistência insuficiente em argamassa com cimento para caracterização de pozolanas. Foram preparadas composições de argamassa com substituição de 50%, em massa, do cimento Portland por cinza volante de madeira e Pozolanita - pozolana obtida a partir do rejeito de beneficiamento de carvão mineral, produzida pelo laboratório LabValora/UNESC. A resistência à compressão da argamassa obtida foi equivalente à argamassa comercial preparada somente com CP IV (~ 37 MPa). Em etapa seguinte, foram formuladas argamassas e concretos com substituição da areia/agregado em 10, 20 e 30% por cinza de grelha de madeira. A composição contendo a fração ligante formada de 50% de cimento CP V-ARI, 33% de Pozolanita e 17% de cinza volante de madeira e a fração agregado composta de 70% de areia natural e 30% de cinza de grelha, apresentou ganho de até 18% na resistência à compressão em argamassas. O módulo de elasticidade sofreu decréscimo de até 16% e a absorção de água teve incremento de 22,5% no concreto com resíduo. O agregado cinza de grelha de madeira apresentou reatividade no ensaio de reação álcali-agregado, porém, o uso da cinza volante de madeira e de Pozolanita mitigou o efeito expansivo da reação. Os produtos cimentícios produzidos com resíduos foram classificados segundo a NBR 10004 em não perigoso – classe II.

Palavras-chave: Argamassa. Cinza de madeira. Concreto. Material cimentício suplementar. Resíduo.

ABSTRACT

Pozzolanas, slag, fillers or supplementary cementitious materials (SCM) incorporated into the cements can increase mechanical strength or diversify characteristics of use. Ashes from biomass such as rice husk, sugar cane bagasse, oil palm and wood waste are some examples of potential additions in hydraulic binders based on Portland cement. The characteristics of the employed materials influence on the mechanical strength and durability of the final product. This work presents results on the characterization of wood fly ash (fine) and bottom ash (thick), with the purpose of replacing, respectively, the cement in the form of SCM, and the small aggregate of the mortar and hydraulic concretes. Chemical analysis showed the major presence of SiO_2 and X ray diffraction analysis revealed amorphous phases in the fly ashes. Tests of pozzolanic activity - lime IPA and performance index with Portland cement proved the reactivity of some ashes with calcium hydroxide, but insufficient resistance in cement mortar for the characterization of pozzolanas. Mortar compositions were prepared with a 50% substitution, in mass, of Portland cement by wood fly ash and Pozolanita - pozzolana obtained from coal mining tailings, made in LabValora/UNESC laboratory. The compressive strength of the obtained mortar was equivalent to the commercial ones prepared with CP-IV only (~ 37 MPa). Then, mortars and concretes were formulated with sand/aggregate replacement in 10, 20 and 30% by wood bottom ash. The composition containing the binding fraction formed by 50% CP V-ARI cement, 33% Pozolanita and 17% wood fly ash and the aggregate fraction composed of 70% natural sand and 30% bottom ash, showed a gain of up to 18% in compressive strength of mortars. The Young's modulus decreased by up to 16% and water absorption increased by 22,5% in concrete with residue. The bottom ash aggregate showed reactivity in the alkali-aggregate's test, however, the use of wood fly ash and Pozolanita mitigated the effect of the reaction. The cementitious products produced with residues were classified according to NBR 10004 in non-hazardous - class II.

Keywords: Mortar. Wood ash. Concrete. Supplementary cementitious materials. Residue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento típico de hidratação de compostos puros.	37
Figura 2 - Taxa de liberação de calor do cimento Portland.....	38
Figura 3 - Volume da pasta de cimento hidratada.....	40
Figura 4 - Representação esquemática da formação do CP.....	41
Figura 5 - Constituintes do concreto.	44
Figura 6 – Etapas do procedimento experimental.	57
Figura 7 – Aspecto visual das cinzas volantes: cv-A oriunda da indústria da confecção, cv-B da indústria cerâmica e cv-C da indústria alimentícia.	61
Figura 8 – Aspecto visual das quatro frações da areia normal brasileira – IPT, divididas em grossa, média grossa, média fina e fina.	61
Figura 9 - Aspecto visual das cinzas de grelha: cg-A proveniente da indústria da confecção, cg-B oriunda da indústria cerâmica, cg-C da indústria alimentícia e cg-ABC formada pela mistura das três cinzas. .	62
Figura 10 - Ensaios da Etapa 1.....	65
Figura 11 – Fotografia mostrando um corpo de prova de argamassa, submetido ao ensaio de resistência à compressão mecânica.	70
Figura 12 – Fotografia mostrando corpos de prova de argamassa, confeccionados para o ensaio de índice de desempenho com cimento Portland, no processo de cura por imersão em água saturada com cal. .	71
Figura 13 - Procedimento da Etapa 2.	72
Figura 14 - Procedimento da Etapa 3.	74
Figura 15 – Fotografia mostrando (a) ensaio de compressão e (b) ensaio de módulo de elasticidade em corpo de prova de concreto.	78
Figura 16 – Fotografia mostrando (a) dimensões de uma barra de argamassa e (b) barras de argamassa em cura intermediária.....	80
Figura 17 – Fotografia mostrando (a) relógio comparador e aparato para medição; (b) barra de aferição usada para zerar o relógio comparador; (c) barra de argamassa submetida à medição.	82
Figura 18 – Fotografia mostrando o posicionamento do corpo de prova no equipamento para ensaio de desgaste por abrasão.....	84
Figura 19 - Distribuição do tamanho de partícula do CP V-ARI.	86
Figura 20 - Difractogramas das cinzas volantes B e C.	91
Figura 21 - Distribuição do tamanho de partícula da cv-B.....	92
Figura 22 - Distribuição do tamanho de partícula da cv-C.....	92
Figura 23 - Difractograma da cinza de grelha cg-ABC.....	99
Figura 24 - Granulometria da cinza de grelha.	100
Figura 25 - Granulometria da areia.	102

Figura 26 - DRX de pasta de cimento CP V e pasta de aglomerante Pesquisa, após 10 dias de cura.	105
Figura 27 - Resistência à compressão média <i>versus</i> quantidade de álcalis.....	106
Figura 28 – Fotografia mostrando (a) os passos para a moldagem do corpo de prova de concreto fresco e (b) o aspecto do concreto e medida do abatimento obtido.....	108
Figura 29 - Resistência à compressão de concretos e argamassas com cinzas de madeira.	111
Figura 30 – Micrografias mostrando (a) partícula de areia em argamassa de referência e (b) partícula de cinza em argamassa com resíduo.....	112
Figura 31 - Diagrama de dosagem: concreto com cinza de madeira...	113
Figura 32 – Fotografia mostrando (a) dimensões das peças de pavimentação projetadas e, (b) peças de pavimentação produzidas com concreto com adição de cinzas de madeira.....	114
Figura 33 - Evolução da absorção por capilaridade.	117
Figura 34 – Fotografias mostrando a ascensão de água em corpos de prova de concreto (10 cm x 20 cm), após o ensaio de absorção de água por capilaridade.....	118
Figura 35 - Resultado do ensaio de ataque por sulfato.....	120
Figura 36 – Fotografia mostrando (a) as seis barras de argamassa do tipo Referência e, (b) as seis barras de argamassa tipo Pesquisa, após serem submetidas ao ensaio de ataque por sulfato.....	121
Figura 37 - Evolução da expansão média no ensaio de RAA.	123
Figura 38 – Micrografias mostrando (a) imagem da superfície do corpo de prova de argamassa Referência e, (b) da superfície do corpo de prova da argamassa Pesquisa após ensaio de desgaste por abrasão.	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos do clínquer.....	36
Tabela 2 - Exigências químicas para materiais pozolânicos.	42
Tabela 3 - Exigências físicas para materiais pozolânicos.....	43
Tabela 4 – Correspondência entre a classe de agressividade de um concreto armado e as características mínimas para atender a durabilidade.....	46
Tabela 5 - Caracterização do CP II-F-32 e CP V-ARI.....	59
Tabela 6 - Composição química da Pozolanita.	59
Tabela 7 - Características da pozolana.	60
Tabela 8 – Tipo de caracterização realizada nas três cinzas volantes utilizadas na pesquisa: cv-A (cinza volante proveniente da indústria da confecção), cv-B (oriunda da indústria cerâmica) e cv-C (cinza volante da indústria alimentícia).	64
Tabela 9 - Quantitativo dos materiais para o ensaio de IAP à cal.	69
Tabela 10 - Misturas de argamassa usando a fração adição mineral composta de Pozolanita e cinza volante “B”......	73
Tabela 11 - Determinação do teor ideal de argamassa.	76
Tabela 12 - Quantidades de materiais para cps concreto.....	77
Tabela 13 – Composição das argamassas, em porcentagem mássica, para ensaio de ataque por sulfato.	80
Tabela 14 - Tipo de cura dos corpos de prova.....	81
Tabela 15 - Composição das barras de argamassa, em porcentagem de massa, para RAA.....	83
Tabela 16 - Caracterização do cimento CP V-ARI.	85
Tabela 17 – Composição química das cinzas volantes cv-A (originária da indústria da confecção), cv-B (proveniente da indústria cerâmica) e cv-C (com origem na indústria alimentícia).	88
Tabela 18 - Massa específica das cinzas volantes de madeira.	89
Tabela 19 - Ensaio de ID com cimento Portland aos 28 dias.....	90
Tabela 20 - Distribuição do diâmetro de partículas.....	93
Tabela 21 - Características das cinzas volantes.....	94
Tabela 22 - Extrato lixiviado e solubilizado cv-B.....	97
Tabela 23 – Composição química de cinzas de grelha ou cinzas grossas.	98
Tabela 24 - Extrato lixiviado e solubilizado da cg-ABC.....	101
Tabela 25 - Caracterização do agregado graúdo.....	103
Tabela 26 - Ensaio de resistência à compressão – 28 e 91 dias.....	104
Tabela 27 - Resultados dos ensaios de abatimento, resistência à compressão e módulo de elasticidade em concreto.	109

Tabela 28 - Absorção de água em concreto.....	115
Tabela 29 - Variação dimensional em barras de argamassa.	120
Tabela 30 - Variação dimensional das barras de argamassa.	122

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação brasileira de cimento Portland
a/c – água/cimento (relação)
BSI – Organismo Nacional de Normalização do Reino Unido
CB – Cinza de biomassa
CBC – Cinza do bagaço da cana de açúcar
CCA – Cinza da casca do arroz
CCC – Cinza da casca da castanha de caju
CCP – Cinza da casca da castanha do Pará
CFB – Cinza da folha da bananeira
cg-A – Cinza de grelha da empresa A
cg-B – Cinza de grelha da empresa B
cg-C – Cinza de grelha da empresa C
cg-ABC – Cinza de grelha (misturada) da empresas A, B e C
CP – Cimento Portland
cps – Corpos de prova
CRD – Cinza do resíduo do dendezeiro
CVB – Cinza volante de biomassa
cv-A – Cinza volante da empresa A
cv-B – Cinza volante da empresa B
cv-C – Cinza volante da empresa C
DRX – Difractometria (difração) de raios X
FRX – Fluorescência de raios X
IAP – Índice de atividade pozolânica
ID – Índice de desempenho
IDT – Instituto de Engenharia e Tecnologia
I.Parque – Parque Científico e Tecnológico
IPAT – Instituto de Pesquisas Ambientais
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
NBR – Norma Brasileira
RAA – Reação álcali-agregado
SCM – Material cimentício suplementar
SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	29
2 OBJETIVOS	33
2.1 OBJETIVO GERAL	33
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	35
3.1 O CIMENTO.....	35
3.1.1 A química do cimento Portland	35
3.1.2 Hidratação do cimento Portland.....	37
3.1.3 Pozolanas.....	40
3.2 O CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.....	43
3.2.1 A durabilidade do concreto	46
3.2.1.1 Ataque por sulfato	47
3.2.1.2 Reação álcali-agregado (RAA)	48
3.3 RESÍDUOS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	49
3.3.1 Cinzas de biomassa (CB)	50
3.3.2 Cinzas de madeira	53
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
4.1 MATERIAIS	58
4.1.1 Cimento	58
4.1.2 Pozolanita.....	59
4.1.3 Cinza volante de madeira	60
4.1.4 Areia normal.....	61
4.1.5 Areia	62
4.1.6 Cinza de grelha de madeira.....	62
4.1.7 Brita.....	63
4.2 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	63
4.2.1 Processamento das cinzas	63
4.2.1.1 Cinzas volantes de madeira.....	63
4.2.1.2 Cinzas de grelha de madeira.....	64
4.2.2 Ensaios e análises.....	65
4.2.2.1 Fluorescência de raios X (FRX).....	66
4.2.2.2 Difração de raios X (DRX).....	66
4.2.2.3 Massa específica	66
4.2.2.4 Superfície específica.....	67
4.2.2.5 Granulometria (Tamanho de partícula).....	67
4.2.2.6 Resíduo insolúvel.....	67
4.2.2.7 Lixiviação e solubilização.....	68
4.2.2.8 Álcalis disponíveis.....	68
4.2.2.9 Análise de cloretos.....	69

4.2.2.10 Índice de atividade pozolânica à cal – IAP à cal.....	69
4.2.2.11 Índice de desempenho com cimento – ID com cimento.....	71
4.2.2.12 Absorção de água.....	72
4.3 ETAPA 2: ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE DE MADEIRA EM ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND	72
4.4 ETAPA 3: ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE E CINZA DE GRELHA EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.....	74
4.4.1 Teor de argamassa	75
4.4.2 Composições do concreto com cinza de grelha	76
4.5 ETAPA 4: AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DO CONCRETO COM CINZA VOLANTE E CINZA DE GRELHA DE MADEIRA ...	78
4.5.1 Absorção de água	79
4.5.2 Absorção de água por capilaridade	79
4.5.3 Ataque por sulfato	79
4.5.4 Reação álcali-agregado	82
4.5.5 Desgaste por abrasão	83
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	85
5.1.1 Cimento CP V-ARI	85
5.1.2 Cinza volante de madeira	87
5.1.3 Cinza de grelha de madeira.....	98
5.1.4 Areia	102
5.1.5 Brita.....	103
5.2 ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE DE MADEIRA EM ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND	103
5.3 ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE E CINZA DE GRELHA DE MADEIRA EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND	107
5.3.1 Teor de argamassa e trabalhabilidade	107
5.3.2 Adição de cinza de grelha ao concreto.....	108
5.4 ANÁLISES DE DURABILIDADE	115
5.4.1 Absorção de água	115
5.4.2 Absorção de água por capilaridade	116
5.4.3 Ataque por sulfato.....	119
5.4.4 Reação álcali-agregado (RAA).....	121
5.4.5 Desgaste por abrasão	123
5.4.6 Caracterização ambiental.....	124
6 CONCLUSÃO	127
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	129

1 INTRODUÇÃO

Desde a descoberta do cimento Portland e da sua fabricação em escala comercial, a proporção e tipo de materiais usados na produção do concreto vêm passando por transformações (HELENE; TERZIAN, 1992).

O concreto de cimento Portland é amplamente utilizado em quase todas as atividades de construção, a tal ponto de criar uma interdependência com os sistemas construtivos (RAO et al., 2015). Atualmente, é o principal material e o produto de construção mais fabricado do mundo em termos de volume (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Estima-se que o consumo médio de concreto é de 10 kg por pessoa por dia (USGS, 2016).

Concretos modernos podem ser desenvolvidos para aplicações específicas e, contêm cada vez mais adições minerais, aditivos e fibras, o que modifica profundamente a maneira de conceber os materiais cimentícios (GLEIZE, 2011).

No início dos anos 90, os cimentos compostos já haviam substituído o cimento Portland comum no Brasil na produção de concreto. O reflexo desta tendência pode ser visto na relação clínquer/cimento (tonelada de clínquer / tonelada de cimento produzido), que passou de 0,78 em 1990 para 0,68 em 2005 (MCT, 2010). Essa tendência no uso de adições minerais, foi estimulada por questões ambientais e coloca o país em igualdade de estratégias, neste segmento, com muitos países europeus (BATTAGIN, 2011).

Atualmente, o Brasil conta com 88 fábricas de cimento Portland e em 2013 foram produzidos aproximadamente 71 milhões de toneladas de cimento (CBIC, 2016), sendo que, 90% do cimento comercializado possui adição. O CP II (cimento Portland composto) é o mais produzido no Brasil (SNIC, 2017).

Cimentos Portland compostos surgiram como uma alternativa ao CP I, um cimento sem quaisquer adições além de gesso. Podem ter adição de material carbonático, pozolânico e/ou escória de alto forno. Possuem baixo calor de hidratação, o que o torna recomendável para concretagem de grandes volumes (ABCP, 2002).

No Brasil, as cinzas volantes originadas da queima do carvão mineral, são usadas pelas cimenteiras como adição pozolânica aos cimentos. Ainda assim, existe a disponibilidade para aproveitamento de aproximadamente 1 (um) milhão de toneladas de cinzas volantes por

ano, oriundas de termoeleétricas ou de empresas que usam o carvão mineral para gerar energia em seus processos (ROHDE, 2016).

Os benefícios das adições ao cimento e/ou concreto estão relacionados à perspectiva de desenvolvimento sustentável, incluindo a diminuição da poluição do ar e de CO₂ na produção do cimento (GLEIZE, 2011; RAMOS; MATOS; COUTINHO, 2013). Para cada 600 kg de cimento produzido, cerca de 400 kg de CO₂ é liberado na atmosfera (CHOWDHURY; MISHRA; SUGANYA, 2015). Além disso, adições minerais ou resíduos podem proporcionar melhoras aos materiais cimentícios onde serão incorporados.

A viabilidade de uso de um resíduo, em qualquer processo de produção, passa por fatores como disponibilidade contínua, quantidade produzida, grau de pureza, condições de mercado, custos e disponibilidade de transporte, custos inerentes ao processo de transformação, custos de deposição de resíduos e ainda os impactos ambientais envolvidos (RAUPP-PEREIRA, 2006).

No caso de adições minerais em cimento Portland, os custos do transporte de longa distância inviabilizam a utilização de resíduos que sejam produzidos longe das cimenteiras (BATTAGIN, 2011).

Alguns resíduos possuem composições químicas e mineralógicas que os credenciam para substituir parcial ou totalmente as matérias-primas tradicionais (MARTINS et al., 2007).

Neste contexto, as cinzas de biomassa geradas nas indústrias ou agroindústrias são pesquisadas como material cimentício complementar alternativo (LESSARD et al., 2017). A gestão sustentável das cinzas promove ganhos ao meio ambiente e qualidade de vida. Desta forma, menos materiais são destinados a aterros e menos matérias-primas retiradas do meio ambiente (DAL MOLIN, 2011).

A combustão da madeira, na forma de lenha, cavacos, serragem entre outros, gera a cinza da biomassa proveniente da silvicultura. De acordo com o Balanço Energético Nacional (MME, 2016), a produção de lenha no Brasil em 2014 foi da ordem de 80 milhões de toneladas. Somente nas indústrias foram consumidos aproximadamente 25 milhões de toneladas de lenha. Paralelo ao consumo da lenha, há a produção de cinza da ordem de 3% (BORLINI et al., 2005), o que resulta em um volume aproximado de 750 mil toneladas de cinza ao ano provenientes apenas do setor industrial.

Assim como a cinza da casca de arroz, tradicionalmente estudada como adição mineral em cimento, procura-se avaliar as potenciais

características pozolânicas que a cinza de biomassa apresenta ao ser adicionado a produtos cimentícios (BAN; RAMLI, 2011).

Cinzas de biomassa geralmente não contêm elementos tóxicos. No entanto, os constituintes destas cinzas são bastante diversos e dependem do solo, processamento, condições térmicas entre outros. Em geral, os elementos inorgânicos que formam esse tipo de cinza são Ca, K, Na, Si e P. Mineralogia, tamanho e forma de partículas dependem fundamentalmente da técnica de combustão (GARCIA; COUTINHO, 2013; DAL MOLIN, 2011).

Diante do exposto, o presente trabalho propõe o estudo da adição de cinza volante da biomassa madeira como componente ligante e, de cinza de grelha como agregado em composições cimentícias. Pretende-se somar conhecimentos para diversificar a oferta de materiais cimentícios suplementares por meio da incorporação de resíduos, e consequentemente contribuir para a valorização do resíduo.

A pesquisa está dividida em sete capítulos. O capítulo 1 traz uma introdução ao tema proposto e, o capítulo 2 cita os objetivos geral e específicos a serem alcançados ao final da pesquisa. O capítulo seguinte contempla a fundamentação teórica e o capítulo 4 relaciona os materiais e métodos utilizados na fase experimental. No capítulo 5 são mostrados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios. O capítulo 6 apresenta as conclusões do estudo, seguido pelo capítulo 7 com sugestões para futuros trabalhos relacionadas ao tema.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o efeito da adição de cinza volante de madeira como componente ligante e, de cinza de grelha como agregado em composições cimentícias, sob o aspecto da resistência mecânica e da durabilidade.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as cinzas volantes para classificá-las quanto ao tipo de adição mineral;
- Avaliar o desempenho mecânico da adição da cinza volante de madeira em argamassa, para verificar seu efeito como ligante auxiliar ao cimento Portland;
- Avaliar o desempenho mecânico de um concreto produzido com cinza de grelha como substituição parcial do agregado miúdo, com o objetivo de verificar suas propriedades;
- Analisar a durabilidade do material obtido, por meio de ensaios acelerados de absorção de água, ataque por sulfato e reação álcali-agregado, comparando com o desempenho de uma composição cimentícia comercial.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O CIMENTO

Após 2.000 anos, edifícios romanos construídos com cimento de cal e cinza vulcânica ainda estão de pé. A cal, obtida a partir do aquecimento do carbonato de cálcio (CaCO_3), era misturada com a cinza vulcânica, vinda da cidade de Pozzuoli (pertencente à Província de Nápoles, Itália). A palavra pozzolana deriva do nome da cidade e os cimentos a base da cinza foram chamados de cimentos pozzolana (ASHBY; JONES, 2007).

Em 1824, Joseph Aspdin obteve uma patente para um cimento de qualidade superior, semelhante à pedra Portland (um calcário branco proveniente da ilha de Portland, UK). O material era preparado pela queima de uma mistura de CaCO_3 e argila (NEVILLE, 2016).

O cimento Portland moderno é obtido a partir da mistura e moagem de calcário e argila. O composto é queimado em temperatura próxima de $1.450\text{ }^\circ\text{C}$ e o material obtido chamado de clínquer. Após o resfriamento, o clínquer recebe a adição de sulfato de cálcio, sendo a mistura submetida à nova moagem. O produto resultante é o cimento Portland comum (BATTAGIN, 2011).

Existem ainda os cimentos compostos, criados para atender a indústria da construção. Dentre eles: cimentos pozolânicos, cimentos de pega e endurecimento rápidos e cimentos brancos são os mais expressivos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

3.1.1 A química do cimento Portland

As matérias-primas para fabricação do clínquer Portland devem conter fundamentalmente óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). Jazidas de calcário são fontes naturais de cálcio. Argilas são as fontes preferidas de sílica e alumina. O óxido de ferro comumente provém do minério de ferro (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A proporção dos compostos químicos de natureza calcária, silicosa, aluminosa e/ou ferrífera é processada em torre de ciclone, onde encontra temperaturas progressivamente elevadas ($45\text{ }^\circ\text{C}$ a $900\text{ }^\circ\text{C}$). Inicialmente, a água é evaporada e o CO_2 é liberado. Após, o material passa por uma série de reações químicas, quando enfim chega à parte mais quente do forno rotativo ($1450\text{ }^\circ\text{C}$), onde ocorre a fusão de 20 a

30% da mistura e as reações entre óxido de cálcio, sílica e alumina. O material obtido, em forma de esferas com diâmetro de 3 a 25 mm, é chamado de clínquer (KIHARA; CENTURIONE, 2005; BATTAGIN, 2011; NEVILLE, 2016). O clínquer apresenta quatro compostos principais conforme é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais compostos do clínquer.

Composto	Abreviação	Nomenclatura
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	alita
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	belita
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	aluminato tricálcico
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	ferroaluminato tetracálcico

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, 2008.

A alita (C_3S) compreende, em massa, de 40 a 70% do clínquer. Aparece na forma de pequenos grãos, incolores e equidimensionais. É importante no desenvolvimento da resistência mecânica e endurecimento nos primeiros 28 dias após a hidratação do cimento (KIHARA et al., 1990 apud KIHARA; CENTURIONE, 2005; NEVILLE, 2016).

A belita (C_2S) pode ter três formas: $\alpha\text{-C}_2\text{S}$, que existe em temperaturas acima de $1.450\text{ }^\circ\text{C}$ e se transforma em $\beta\text{-C}_2\text{S}$ em temperaturas próximas a $1.450\text{ }^\circ\text{C}$, e o $\gamma\text{-C}_2\text{S}$, que se forma a partir do $\beta\text{-C}_2\text{S}$ em temperaturas de aproximadamente $670\text{ }^\circ\text{C}$. Nos processos atuais de produção de clínquer, a forma predominante é o $\beta\text{-C}_2\text{S}$ com aparência de grãos arredondados e normalmente geminados (NEVILLE, 2016). A belita desempenha papel importante no desenvolvimento da resistência mecânica do cimento em idades acima de 28 dias (BATTAGIN, 2011).

O C_3A contém impurezas como magnésio, sódio, potássio e sílica em sua estrutura cristalina (CINCOTTO, 2011). A reatividade do C_3A deriva da complexidade das estruturas formadas e a quantidade de vazios estruturais (MEHTA; MONTEIRO, 2008). É o componente mais reativo do clínquer, responsável pela pega do cimento (BATTAGIN, 2011).

O ferroaluminato tetracálcico é uma solução sólida e tem papel importante na resistência ao ataque de sulfatos nas estruturas de concreto. Assim como o aluminato tricálcico, o C_4AF possui impurezas

e estrutura cristalina complexa caracterizada por grandes vazios estruturais (KIHARA et al., 1990 apud KIHARA; CENTURIONE, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Existem compostos secundários do clínquer presentes em pequenas quantidades como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O e Na_2O . Dentre eles, os óxidos K_2O e Na_2O , conhecidos como álcalis, podem reagir com alguns agregados causando a desintegração do concreto (NEVILLE, 2016).

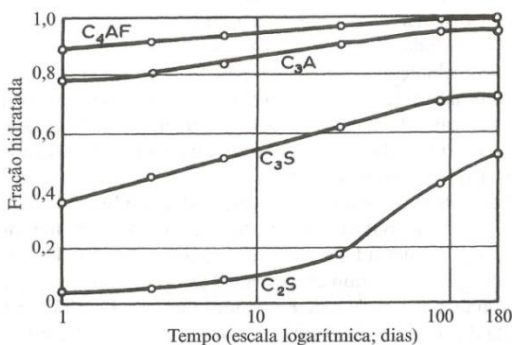
Após a obtenção do clínquer, é realizada a adição de sulfato de cálcio em proporções que variam de 2 a 5%, como o objetivo de regular o tempo de pega do produto de Cimento Portland (BATTAGIN, 2011).

3.1.2 Hidratação do cimento Portland

Inicialmente, a água deve proporcionar uma suspensão e dispersão homogêneas dos sólidos para interação entre as partículas. O início da dissolução das fases do clínquer e do sulfato de cálcio é imediato. O sistema é dinâmico, com fases se dissolvendo e outras se formando/ transformando por não serem estáveis (CINCOTTO, 2011).

A velocidade de hidratação dos compostos do cimento em estado puro é mostrada na Figura 1. Devido à interação entre eles numa pasta, argamassa ou concreto de cimento Portland, a velocidade de hidratação não é mesma, porém auxilia na compreensão do desenvolvimento da resistência (NEVILLE, 2016).

Figura 1 - Desenvolvimento típico de hidratação de compostos puros.



Fonte: Copeland; Bragg, 1953 apud Neville, 2016.

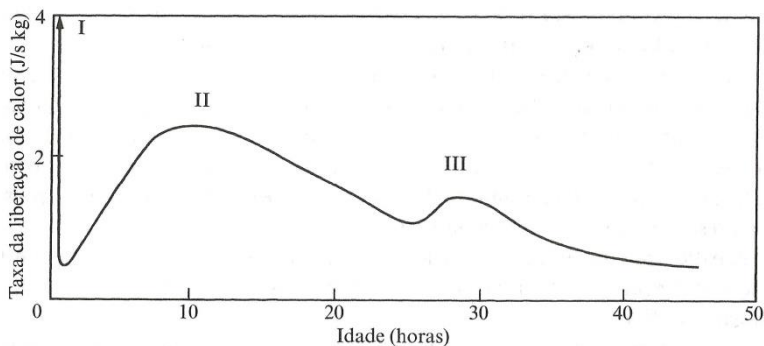
O cimento CP V-ARI, por exemplo, caracterizado pela pega rápida, possui valores elevados de C_3S e C_3A , ambos de elevada solubilidade (CINCOTTO, 2011), além de moagem mais fina. No entanto, apesar de apresentar ganhos de resistência elevados nas primeiras idades, há um decréscimo na velocidade ao longo do tempo, chegando a resistências próximas aos outros cimentos em idades avançadas (BATTAGIN, 2011).

Conforme Neville (2016), o C_3S , na presença de uma quantidade limitada de água, produz um silicato de menor basicidade e libera hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Existem incertezas de que a belita hidratada resulte nos mesmos produtos. Ainda segundo Neville (2016), “possivelmente, existem vários silicatos de cálcio hidratados diferentes”. Geralmente, esses compostos hidratados são descritos como C-S-H.

A hidratação do cimento é uma reação exotérmica; portanto, a taxa de liberação de calor é um indicativo da velocidade de hidratação (NEVILLE, 2016). O acompanhamento da evolução dessas reações nas primeiras 72 h é importante para a tecnologia de materiais cimentícios (CINCOTTO, 2011).

Na Figura 2 é mostrada a taxa de liberação de calor durante a hidratação de um determinado cimento Portland, com relação água/cimento igual a 0,4.

Figura 2 - Taxa de liberação de calor do cimento Portland.



Fonte: Bye, 1983 apud Neville, 2016.

É possível identificar (na Figura 2) um primeiro pico, correspondente à hidratação do C_3S , de elevada liberação de calor e bastante curto (nos primeiros 15 minutos) (NEVILLE, 2016). Este pico

indica o calor no molhamento das partículas e dissolução inicial (TAYLOR, 1997). Após, ocorre um período de dormência, geralmente entre uma e duas horas, durante o qual a velocidade de hidratação é baixa e a pasta de cimento é trabalhável (NEVILLE, 2016).

Um segundo pico de liberação de calor ocorre entre 4 e 10 h após a hidratação. Possivelmente, devido ao crescimento dos cristais de Portlandita, a camada superficial é rompida e os grãos individuais entram em contato, iniciando o fenômeno da pega e formação do C-S-H (NEVILLE, 2016; CINCOTTO, 2011). Este pico pode ser acelerado pela presença de álcalis e maior finura dos grãos de cimento. O terceiro pico, de menor intensidade, ocorre entre 18 e 30 h após a hidratação. Esse pico está associado ao esgotamento do sulfato de cálcio e a retomada da hidratação do C_3S (NEVILLE, 2016).

Antes das reações de hidratação estarem completas, a pasta de cimento já apresenta alguma resistência. Sugere-se que uma pequena quantidade de compostos hidratados adere ao cimento anidro, resultando em hidratação posterior e acréscimo de resistência ao longo do tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

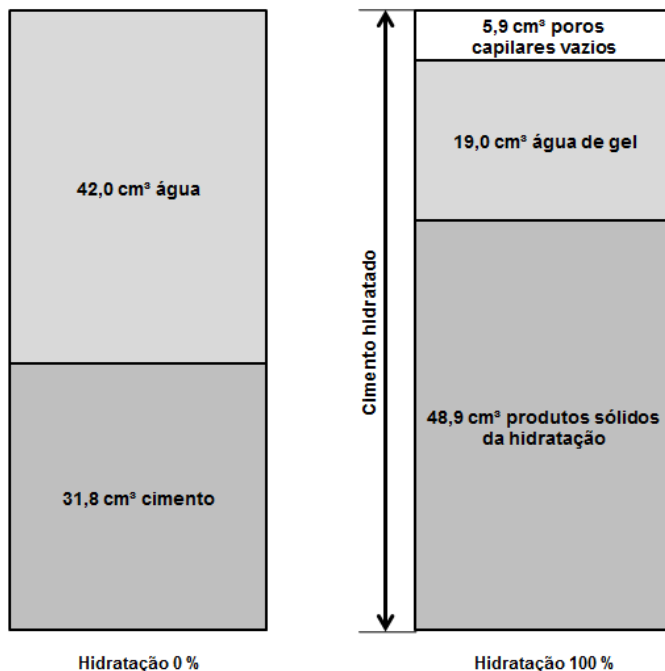
O processo de hidratação de uma pasta de cimento ou concreto é contínuo durante anos, gerando um conjunto sucessivo de microestruturas com diferentes estágios de desenvolvimento (PAULON; KIRCHHEIM, 2011).

A Figura 3 mostra um exemplo da hidratação de 100 g de cimento, admitida relação água/cimento igual a 0,42. Adotou-se a massa específica do cimento seco como sendo $3,15 \text{ g/cm}^3$. De acordo com Neville (2016), o volume aparente da pasta de cimento hidratada, após a pega, permanece aproximadamente constante, ou seja, o espaço total disponível para os produtos da hidratação consiste no volume absoluto do cimento seco juntamente com o volume da água adicionada à mistura.

A estrutura física do gel de cimento fornece uma ideia das propriedades mecânicas do cimento e do concreto endurecido. O grau de hidratação do cimento é maior sob uma condição de cura úmida (NEVILLE, 2016).

A NBR 5738 (2015) estabelece como procedimento padrão, para comprovar a qualidade de um concreto de cimento Portland, a imersão em solução saturada de hidróxido de cálcio a temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Os corpos de prova devem ser submetidos a esta condição até o momento do ensaio mecânico.

Figura 3 - Volume da pasta de cimento hidratada.



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, 2008.

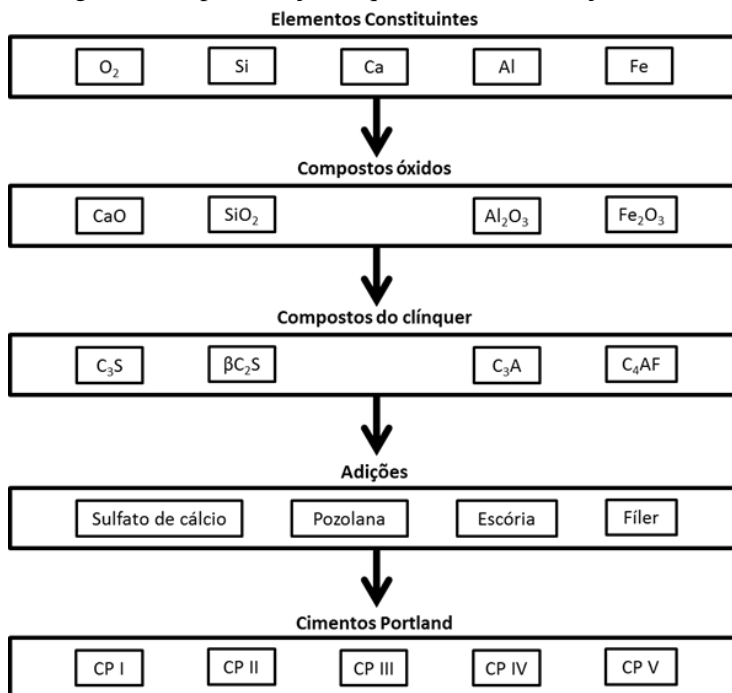
3.1.3 Pozolanas

Material pozolânico é definido pela NBR 12653 (2014) como um material silicoso ou sílico-aluminoso, que isoladamente possui pouco ou nenhum poder aglomerante. Porém, quando finamente dividido e na presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, a temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentantes. Ainda de acordo com a norma, as pozolanas são classificadas em classe N, C e E.

Pozolanas da classe N podem ser naturais (materiais vulcânicos, folhelhos calcinados e terra diatomácea) ou artificiais (MEHTA, 1987). Na classe C, enquadram-se as cinzas volantes produzidas pela queima do carvão mineral em termoeletricas. Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores são classificadas em classe E.

Na fabricação dos cimentos compostos, adições como pozolana, fíler ou escória são incorporadas ao material após a obtenção do clínquer (Figura 4).

Figura 4 - Representação esquemática da formação do CP.



Fonte: Adaptado de Neville, 2016.

A adição de pozolanas proporciona propriedades específicas, com certas vantagens sobre o cimento comum, tais como: durabilidade, diminuição da extração de calcário (jazidas), reciclagem de resíduos industriais e razões ambientais pela diminuição das emissões de gases de efeito estufa (envolvidos na queima do material virgem) (BATTAGIN, 2011).

As reações pozolânicas ocorrem devido a interação das pozolanas com o $Ca(OH)_2$ do cimento, produzindo C-S-H adicional, material mais resistente e durável do que os produtos que o originou, além de serem eficientes em preencher espaços capilares (ROMANO et al., 2006).

Na avaliação da atividade pozolânica de um material, apresentam interesse ensaios com misturas pozolana-cal, pozolana-cimento e aplicação em concreto (CINCOTTO, 2011).

O teor e as características dos materiais pozolânicos alteram as propriedades dos cimentos pozolânicos. Conforme Mehta e Monteiro (2008), quando adicionamos um componente não inerte ao cimento, é provável que ocorram mudanças no curso da hidratação, resultando em alterações na estrutura endurecida. A atividade pozolânica depende da área específica da pozolana, dos teores de sílica e alumina reativas, da estrutura cristalina desordenada e da sua capacidade de se combinar com a cal para formar compostos com propriedades cimentantes (BATTAGIN, 2011).

De acordo com as normas brasileiras, que especificam as adições para o cimento Portland comum, os materiais pozolânicos podem constituir até 50% da massa total do ligante (NBR 5736, 1999; BATTAGIN, 2011). Devem estar em conformidade com as exigências químicas e físicas mostradas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 - Exigências químicas para materiais pozolânicos.

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, %	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO_3 , %	$\leq 4,0$	$\leq 5,0$	$\leq 5,0$
Teor de umidade, %	$\leq 3,0$	$\leq 3,0$	$\leq 3,0$
Perda ao fogo, %	$\leq 10,0$	$\leq 6,0$	$\leq 6,0$
Álcalis disponíveis em Na_2O , %	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$

Fonte: NBR 12653, 2014.

Inúmeros tipos de cinzas de biomassa já foram alvo de pesquisas como adição mineral, dentre as quais destaca-se a cinza da casca de arroz, cinza da folha de bananeira, cinza de dendezeiro e cinza do bagaço da cana-de-açúcar (DAL MOLIN, 2011; KANNING, 2010; TANGCHIRAPAT; JATURAPITAKKUL; CHINDAPRASIRT, 2009).

Tabela 3 - Exigências físicas para materiais pozolânicos.

Propriedade	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 μm , %	< 20	< 20	< 20
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle, %	≥ 90	≥ 90	≥ 90
Atividade pozolânica com cal aos sete dias, em MPa	$\geq 6,0$	$\geq 6,0$	$\geq 6,0$

Fonte: NBR 12653, 2014.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a melhora dos produtos cimentícios por meio da adição de pozolanas deve-se à interação entre a cal e os óxidos presentes nos materiais pozolânicos. O composto alita, presente no cimento Portland, na interação com a água, hidrata produzindo C-S-H e Ca(OH)_2 em uma reação rápida. As pozolanas reagem com o Ca(OH)_2 na presença de água produzindo C-S-H em uma reação mais lenta que a primeira.

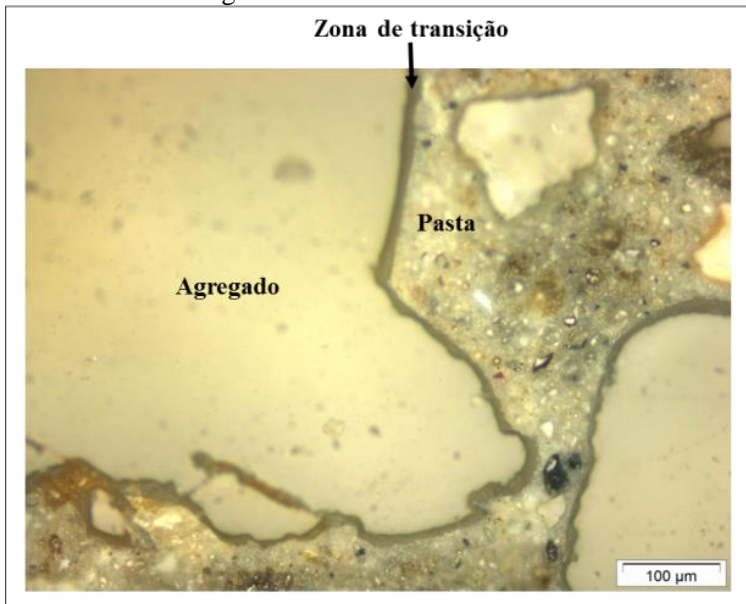
3.2 O CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Na composição de um concreto convencional, o cimento corresponde a aproximadamente 15% do total da mistura, sendo 76% de agregados graúdos e miúdos e 9% de água (JOHN, 2011). O adesivo que mantém unido esses materiais é formado pela pasta de cimento (ASHBY; JONES, 2007). As propriedades do concreto decorrem do resultado de reações químicas entre os compostos do cimento e a água (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O concreto basicamente é formado por três fases (Figura 5): agregado, pasta e zona de transição. Dois deles alteram-se com o tempo e sob influência da umidade e temperatura ambiente, atribuindo à microestrutura do material a propriedade de não ser estática (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Cada fase do concreto é de natureza multifásica. Cada partícula de agregado pode conter vários minerais, microfissuras e vazios. A pasta de cimento e a zona de transição contêm uma distribuição heterogênea de diferentes tipos de quantidade de fases sólidas, poros e microfissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 5 - Constituintes do concreto.



Fonte: O autor, 2017.

A fase agregado pode ser vista a olho nu, a partir de uma seção transversal de concreto. Os agregados não entram em complexas reações químicas com a água, ainda assim, esta fase é a principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Essas propriedades dependem principalmente da densidade e resistência do agregado, que por sua vez, são determinadas pelas propriedades físicas e químicas, sendo as propriedades físicas, normalmente, mais importantes tais como volume, tamanho e porosidade (METHA; MONTEIRO, 2008).

Os agregados normalmente não apresentam influência direta na resistência do concreto, exceto no caso de alguns materiais altamente porosos e fracos (PAULON, 2005).

A pasta de cimento hidratada é uma reunião heterogênea de partículas, filmes, microcristais e elementos sólidos, ligados entre si por uma massa porosa que por sua vez contém espaços com soluções e poros (PAULON; KIRCHHEIM, 2011). As heterogeneidades microestruturais podem levar a efeitos negativos na resistência,

permeabilidade e durabilidade, porque essas últimas são controladas pelos extremos microestruturais e não pela microestrutura média. Variações locais na relação água/cimento são as principais fontes da heterogeneidade na microestrutura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Em uma pasta de cimento completamente hidratada, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) constitui de 50 a 60% do volume de sólidos (PAULON; KIRCHHEIM, 2011). A resistência é atribuída principalmente às forças de Van der Waals (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O Ca(OH)_2 , também chamado de Portlandita, compõe de 20 a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada. Quando comparado ao C-S-H, tem limitada contribuição na resistência (PAULON; KIRCHHEIM, 2011). Os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 15 a 20% do volume de sólidos na pasta de cimento, assumindo papel secundário na relação com as propriedades do material (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os vazios numa pasta são compostos por: vazio interlamelar no C-S-H; poros capilares com tamanho que varia de 10 nm e 1 μm ; e vazios de ar da ordem de 3 mm (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Vazios maiores que 50 nm têm mais influência na determinação da resistência e permeabilidade. Quando os vazios na pasta são menores do que 50 nm influenciam na retração por secagem e fluência (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997).

Na pasta de cimento hidratada, a água pode existir em diferentes formas sendo classificada de acordo com o grau de dificuldade com que pode ser removida: água capilar, água adsorvida, água interlamelar e água quimicamente combinada (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A principal fonte de resistência nos produtos sólidos da pasta de cimento é a existência das forças de atração de van der Waals, devido as grandes áreas superficiais dos produtos da hidratação do cimento. Nos sólidos, há uma relação inversa entre porosidade e resistência mecânica. A resistência mecânica está associada à parte sólida e os vazios são prejudiciais ao desempenho da mesma. O volume de vazios depende da combinação água/cimento usada durante a mistura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A zona de transição é uma camada com espessura de 10 a 50 μm ao redor do agregado, que embora constituída dos mesmos elementos que a pasta, normalmente é mais fraca do que o agregado ou a pasta de cimento hidratado, exercendo uma influência muito maior sobre o comportamento mecânico do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A rigidez e o módulo de elasticidade sofrem grande influência da zona de transição, devido ao volume de vazios e microfissuras existentes (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

3.2.1 A durabilidade do concreto

Conforme o ACI Committee 201.2R (American Concrete Institute), a “durabilidade do concreto é determinada pela sua capacidade de resistir à ação do intemperismo, ataque químico, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração”.

Quanto às estruturas de concreto, existem vários mecanismos de deterioração que podem afetar a durabilidade do material, além das interações entre diferentes fenômenos. Segundo Mehta e Monteiro (2008), em ordem decrescente de importância, as principais causas de deterioração em estruturas de concreto são: corrosão da armadura, ciclos de gelo e degelo, reação álcali-agregado e ataque por sulfato. Ainda segundo o autor, a permeabilidade é a chave da durabilidade.

A NBR 6118 (2014) menciona que a durabilidade é um requisito de qualidade da estrutura de concreto e, associa o fator a/c, usado nas composições cimentícias, com a resistência a compressão e com a durabilidade do material. A Tabela 4 mostra a correspondência entre o ambiente no qual a estrutura de concreto está inserida e, os requisitos normativos mínimos para atender a durabilidade.

Tabela 4 – Correspondência entre a classe de agressividade de um concreto armado e as características mínimas para atender a durabilidade.

Classe de agressividade	Descrição do tipo de ambiente correspondente à classe de agressividade	Relação a/c	Resistência à compressão (MPa)
I	Rural, submerso.	$\leq 0,65$	≥ 20
II	Urbano.	$\leq 0,60$	≥ 25
III	Marinho, industrial (forte).	$\leq 0,55$	≥ 30
IV	Industrial (muito forte), respingos de maré.	$\leq 0,45$	≥ 40

Fonte: NBR 6118, 2014.

Sabe-se que a pasta de cimento hidratada é alcalina (pH entre 12,5 e 13,5) e a exposição às águas ácidas pode ser prejudicial ao material (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A capacidade de dissolver substâncias, em especial ácidos e bases, e carregar espécies químicas do meio ambiente para o interior do concreto, faz da água um agente importante em processos de degradação (ISAIA, 2011).

Na pasta de cimento endurecida, em geral, quando a relação água/cimento é alta e o grau de hidratação é baixo, a pasta terá porosidade capilar alta, com maior quantidade de poros grandes (maiores do que 50 nm) e bem conectados, e coeficiente de permeabilidade alto. Com o desenvolvimento da hidratação, os poros têm seus tamanhos reduzidos e perderão suas interconexões, reduzindo a permeabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A deterioração do concreto abrange causas físicas e/ou químicas. Incluem causas físicas: desgaste superficial ou perda de massa devido à abrasão, erosão e cavitação; fissuração devido à cristalização de sais nos poros, carregamento estrutural e exposição à temperatura extrema (fogo e congelamento) (MEHTA; MONTEIRO, 2008; PRISZKULNIK, 2011).

Incluem causas químicas: hidrólise dos componentes da pasta de cimento; reações de troca catiônica; ataque por sulfato; reação álcali-agregado; hidratação de MgO e CaO cristalinos e corrosão das armaduras em concreto armado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

3.2.1.1 Ataque por sulfato

O sulfato pode ser encontrado sob diversas formas e concentrações no solo, na água da chuva, em águas subterrâneas, em terras agrícolas, efluentes da indústria química, na decomposição de matéria orgânica em lagos rasos, pântanos etc. (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O ataque por sulfatos se manifesta na desagregação, expansão, fissuração, perda de resistência do concreto devido à perda de coesão na pasta e perda de aderência entre a pasta de cimento e as partículas de agregado. O concreto atacado por sulfatos tem aparência esbranquiçada e a deterioração leva o concreto a uma condição mole (NEVILLE, 1997).

Devido à presença do Ca(OH)_2 na pasta de cimento hidratada, quando ocorre a penetração de íons de sulfato, juntamente com a água, ocorre a formação do gesso. Em seguida, os sulfatos reagem com o

aluminato tricálcico hidratado presente na pasta de cimento formando a etringita secundária. Ambas as reações causam expansão e fissuração no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A deterioração pode ser prevenida por meio do uso de cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60 e 70% de escória granulada, baixo teor de C_3A no cimento ($< 8,0\%$) e uso de material pozzolânico (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997; BATTAGIN, 2011).

3.2.1.2 Reação álcali-agregado (RAA)

Reações químicas envolvendo os álcalis (sódio e potássio), íons de hidroxila da pasta de cimento Portland e certos minerais silicosos reativos presentes no agregado, são denominadas reação álcali-agregado (RAA). Os álcalis dissolvem o hidróxido de cálcio e envolvem a sílica ativa dos agregados (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Chatterji (1979) explica que a presença de $Ca(OH)_2$ livre é essencial para o desenvolvimento da reação expansiva e que sua falta suprime a reação deletéria. É uma reação lenta que provoca a deterioração do concreto endurecido, pela formação de um gel expansivo que se deposita nos vazios da argamassa ou concreto e na interface pasta-agregado (HASPARYK, 2011).

Expansão e fissuração em forma de “mapa” (em concreto sem armadura) e fissuração orientada (em concreto armado), perda da resistência e módulo de deformação, pipocamento e exsudação de gel viscoso sílico alcalino são as principais manifestações desse fenômeno. Três fatores podem contribuir para a RAA: teor de álcalis no cimento e consumo de cimento no concreto, agregados reativos ou adições reativas e a disponibilidade de umidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A norma Brasileira NBR 15577 (2008) é composta de 6 partes e trata exclusivamente da reação álcali-agregado. Com base nesta norma, é possível projetar e construir uma estrutura de concreto atuando na prevenção dos riscos de incidência da RAA. No Brasil, a incidência de obras afetadas pelo fenômeno se dá principalmente em usinas hidrelétricas e barragens (HASPARYK, 2011).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o teor de álcalis de 0,6% ou menos, no cimento, normalmente é considerado insuficiente para causar danos devido à reação álcali-agregado. No caso de cimento com baixa alcalinidade, o fenômeno expansivo pode ser ativado por meio do fornecimento de íons alcalinos de outra fonte como aditivos,

adições, agregados contaminados, etc. A NBR 15577-1 (2008) recomenda limitar o teor de álcalis no concreto em $3,0 \text{ kg/m}^3$.

3.3 RESÍDUOS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Resíduos oriundos do processo de industrialização, de forma geral, tornam-se um subproduto indesejável, à medida que são parte da transformação de recursos naturais em lixo, formando volumes com novas características de periculosidade difíceis de serem reincorporados à natureza (STRAUCH, 2008).

Neste sentido, a incorporação de resíduos ao concreto, possibilita a redução no volume de extração das matérias primas por parte da indústria da construção, preservação de recursos naturais limitados, redução na produção de lixo, redução da poluição gerada decorrente da fabricação do cimento e produção de materiais cimentícios com características específicas (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011; DAL MOLIN, 2011).

Adições minerais em cimentos e agregados reciclados em concreto são, em geral, propostas recorrentes em pesquisas (DAL MOLIN, 2011; SBRIGHI, 2011).

O uso de agregados reciclados de construção e demolição (RCD) em concreto é um mercado incipiente no Brasil. Porém, países como Japão já possuem normas para produção de RCD de alta qualidade. A reciclagem, em geral, exige operações como: segregação na origem, triagem, cominuição com ou sem tratamento térmico, separação magnética entre outras (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011).

Escórias de alto forno podem ser moídas e graduadas para uso como agregado miúdo ou graúdo. Em países como Japão, Estados Unidos e alguns países da Europa, o uso desse tipo de resíduo como agregado é bem difundido. No Brasil, isso não ocorre porque a escória é granulada tendo mercado como adição mineral na indústria cimenteira (SBRIGHI, 2011).

Adições minerais comumente utilizadas são resíduos de outras indústrias, que seriam descartados com o sem controle no meio ambiente. Possuem alguma propriedade cimentícia que pode substituir parcialmente o cimento, quando adicionados ao concreto, ou substituir o clínquer quando adicionado ao cimento (DAL MOLIN, 2011).

Silva (2007) destaca como vantagens da adição mineral ao concreto, a melhora da trabalhabilidade no estado fresco até a garantia da durabilidade necessária às condições de serviço. As principais

adições usadas no Brasil são: escórias granuladas de alto forno, resíduo da fabricação do aço, pozolanas e filers de natureza calcária.

A incorporação de adições minerais, como a cinza volante, tem efeito no volume de ar incorporado na matriz cimentícia. Basicamente, uma mistura de concreto mais coesa tem capacidade de reter mais ar incorporado do que uma mistura de consistência muito seca ou muito fluída (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Dal Molin (2011), as vantagens das adições minerais dependem de uma série de fatores tais como a finura e forma das partículas, área superficial específica, a relação água-aglomerante, condições de cura, composição química, mineralógica e a quantidade de adição. Dentre os fatores citados anteriormente, a composição mineralógica e a composição granulométrica são as principais responsáveis pela ação diferenciada das adições no comportamento do concreto.

3.3.1 Cinzas de biomassa (CB)

Biomassa é a matéria orgânica de origem vegetal ou animal, utilizada na produção de energia. Tem a vantagem de ser armazenável e, a desvantagem de ter que ser transportada quando sua produção não está próxima do local de uso. As biomassas mais utilizadas para produção de energia por meio da combustão, gerando quantidade considerável de cinzas, são a casca de arroz, o bagaço da cana-de-açúcar, a lenha e o carvão vegetal (VASKE, 2012).

Do processo de queima, são geradas as cinzas. Vaske (2012) relata que as cinzas, de modo geral, precisam passar por um processo de moagem, antes de serem adicionadas à massa de concreto, para resultar em resistências semelhantes de concreto sem adição.

Segundo a classificação de Mehta e Monteiro (2008), a casca de arroz aparece como um material altamente pozolânico. Isso se deve ao fato do material possuir sílica amorfa e ter uma área superficial muito alta, tornando-a altamente reativa quando comparada com outros subprodutos pozolânicos e cimentícios.

A cinza da casca de arroz (CCA) apresenta um elevado número de estudos relacionados à adição em massas de concreto e cimento.

Silveira (1996) destaca que em sua pesquisa, houve um incremento de resistência à compressão acima de 10% para adições de 10% de CCA, e para a resistência à tração os ganhos foram da ordem de 17%.

Hoppe (2008) avaliou a carbonatação em concreto estrutural feito com o emprego da CCA moída e in natura. Os concretos feitos com CCA in natura apresentaram coeficientes de carbonatação superiores quando comparado com os coeficientes obtidos nas amostras com CCA moída. A CCA moída propicia um refinamento dos poros em comparação com a cinza in natura, aumentando a tortuosidade dos capilares e consequentemente diminuiu a permeabilidade do concreto.

Pouey (2006) conclui que a CCA tem potencial para ser empregada na produção de cimentos, tanto aquelas menos cristalinas, quanto as mais cristalinas. Para isso, devem passar por um processo de beneficiamento para redução da granulometria.

Conforme o teor de carbono, a CCA pode apresentar colorações que variam do preto ao cinza ou branco rosado. Essas mudanças de cor estão associadas com o processo de combustão e com as transformações estruturais que ocorrem no material devido à variação da temperatura. Quanto maior o teor de carbono, mais escura será a cinza, ou seja, maior a quantidade de matéria orgânica não queimada (DAL MOLIN, 2005). Conforme Pouey (2006), se for pretendida uma colocação mais clara, no concreto confeccionado com cimento com CCA, alguns tratamentos térmicos ou químicos deverão ser empregados na cinza.

A cinza do bagaço da cana de açúcar (CBC) é constituída essencialmente de sílica, podendo ter um comportamento semelhante aquele apresentado pela CCA. O processamento da cinza, incluindo temperatura de calcinação (define o grau de amorfismo) e moagem (maior ou menor reatividade) influenciam diretamente no desempenho do material como adição mineral (DAL MOLIN, 2011).

Paula et al. (2009) estudaram o potencial da CBC como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassa. Foram empregadas taxas de substituição de cimento pela CBC de 0, 10, 20 e 30%, com a cinza apresentando teor de sílica de aproximadamente 84%. Por meio dos resultados dos índices de atividade pozzolânica, comprovou-se a reatividade da cinza. A análise estatística aplicada aos resultados do estudo apontou a possibilidade de se substituir até 20% do cimento Portland CPV ARI por CBC, sem prejuízo a resistência à compressão.

Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) caracterizaram a CBC, sendo que o material passou por dois patamares de queima, o primeiro a 350 °C e o segundo entre 400 e 900 °C com tempo de duração de 3 h em cada patamar. Em seguida, o material foi moído em um moinho de bolas. O resultado dos ensaios em argamassa confirma a atividade

pozolânica da cinza, que pode ser atribuída à presença de sílica amorfa, reduzido tamanho das partículas e elevada área de superfície específica.

Lima (2008) estudou a viabilidade do emprego da cinza da casca da castanha de caju (CCC) como adição mineral em matrizes cimentícias. As cinzas apresentaram baixo teor de sílica (12,7%) com altos teores de álcalis e de óxido de magnésio. Os resultados de pozolanidade não atingiram o mínimo exigido pelas normas, não sendo possível classificá-la como material pozolânico. Os resultados com argamassas confeccionadas com teores de substituição de cimento CP V-ARI de 2,5, 5, 10, 15, 20 e 30% de CCC demonstraram que apenas o teor de 2,5% de adição não trazia prejuízos à resistência. Os elevados índices de retração por secagem e profundidade de carbonatação completam o diagnóstico dado pelo autor, o qual sugere a não viabilidade técnica da CCC para uso em matrizes cimentícias.

Camelo et al. (2005) avaliaram o potencial pozolânico da cinza da casca da castanha do Pará (CCP) e seu emprego como adição mineral em argamassas e concretos. A somatória dos óxidos resultou em 39,71% e perda ao fogo em 71,21% deixando a cinza fora dos limites definidos para materiais pozolânicos. Com relação ao ID com cimento Portland, obteve-se 79,67%. A demanda de água para amassamento aumentou em 13% em relação à argamassa de referência. Considerando-se a argamassa produzida com 35% de substituição do cimento por CCP que proporcionou uma atividade pozolânica de 79,67%, os autores concluíram que o material tem potencial na obtenção de concretos com menores consumos de cimento.

Tangchirapat, Jaturapitakkul e Chindaprasirt (2009) investigaram a utilização de cinza de resíduos do dendezeiro (CRD) como material pozolânico. Os concretos foram produzidos com teores de cinza de 0, 10, 20 e 30%, substituídos em relação ao peso do cimento. Aos 7 dias de idade, para todos os teores de substituição, os valores de resistência foram equivalentes aos do concreto referência (0% de adição). Aos 28 dias, as resistências do concreto com adição de 10, 20 e 30% de cinza foi de 59,5, 60,9 e 58,8 MPa, respectivamente, valores superiores ao concreto referência que foi de 58,5 MPa. Os resultados sugerem que a CRD é um material pozolânico reativo e pode ser usado como adição mineral em concretos de alta resistência, sendo semelhante a outros materiais pozolânicos como a sílica ativa e a cinza volante. Quanto à retração por secagem, o uso da cinza provoca uma discreta redução nesse parâmetro. Os concretos produzidos com cinza apresentaram

menor permeabilidade e melhor resistência ao ataque de sulfatos quando comparados com o concreto de referência.

Ranjbar et al. (2016) produziram concreto auto adensável com a incorporação de CRD na proporção 10, 15 e 20% de adição. O concreto auto adensável tem alta trabalhabilidade e fluidez no estado fresco, e geralmente requer aditivos químicos para garantir seu desempenho, tornando-se um material de maior valor agregado. O objetivo do trabalho foi analisar as propriedades mecânicas e de durabilidade com a adição das cinzas tornando o material mais econômico pela diminuição no consumo de cimento. No ensaio de compressão, os resultados apontam para um retardo no ganho de resistência nas idades iniciais quando comparado com o concreto de referência. Nos ensaios com mais de 28 dias, o concreto com cinza torna-se equivalente ao concreto auto adensável de referência, com ganhos devido à diminuição da permeabilidade e maior durabilidade ao ataque de sulfatos.

Ensaio para determinar o índice de atividade pozzolânica da cinza da folha de bananeira (CFB) mostraram que o resíduo atende aos requisitos mínimos prescritos pelas normas NBR 5751 (2012) e 5752 (2014), sendo estes superiores em 40% para a cal e 17,64% para o cimento (KANNING, 2010).

Foram feitas argamassas com substituição de 10% do cimento Portland por CFB, em massa. As argamassas apresentaram desempenhos compatíveis em relação aos parâmetros do estado fresco e ao comportamento mecânico no estado endurecido. Com adição de 10% de cinza na argamassa, chegou-se a uma resistência 25% maior em relação à argamassa de referência (KANNING et al., 2014).

3.3.2 Cinzas de madeira

No Brasil, as florestas ocupam uma área de aproximadamente 460 milhões de hectares, onde predominam as florestas naturais na ordem de 98,5%. As florestas plantadas representam algo em torno de 1,5% onde prevalecem as espécies de *Pinus spp* e *Eucalipto spp*, que foram responsáveis pela produção de 56,2 milhões de m³ de lenha em 2014 (SFB, 2016).

A madeira, na forma de lenha, cavacos ou serragem, é usada por diversos segmentos tais como: na geração de energia elétrica, consumo residencial, setor comercial, setor agropecuário, produção de cimento, ferro-liga e outros metais, indústria química, produção de alimentos e

bebidas, indústria têxtil, produção de papel e celulose, cerâmicas entre outros (MME, 2016).

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030, a silvicultura – cultivo de florestas, é uma opção para geração de energia de biomassa. A cultura do eucalipto, introduzido no Brasil em 1904, apresenta-se como uma espécie vegetal de rápido crescimento e, adaptada ao clima brasileiro, com produtividade média anual variando de 35 até 60 m³ por hectare por ano em plantios com uso de boa tecnologia. Para efeito de comparação, em polos florestais como Escandinávia e Canadá, as florestas implantadas crescem de 10 a 30 m³ por hectare por ano (MME, 2016).

Segundo Siddique (2012), aproximadamente 70% das cinzas de madeira geradas são depositadas em aterros, 20% são aplicadas sobre o solo para correções no pH e 10% destinados a aplicações diversas.

Alguns fatores que influenciam no comportamento das cinzas volantes em materiais cimentícios são: teores de álcalis, cálcio e sílica (SHERATA; THOMAS, 2000).

Os álcalis, derivados de sódio e potássio, podem participar de reações químicas chamadas RAA. Nos produtos cimentícios, o resultado dessa reação é o desenvolvimento de tensões internas e fissuração. Quanto maior o teor de álcalis da cinza, maior será a alcalinidade no sistema (HASPARYK, 2011).

A quantidade de cálcio e sílica disponíveis afetam os produtos de hidratação de materiais cimentícios. O teor de cálcio elevado reduz a quantidade de álcalis removidos, já uma maior quantidade de sílica aumenta a quantidade de álcalis retirados da solução (SHERATA; THOMAS, 2000).

Cheah et al. (2017) propuseram o uso de cinzas de madeira com elevado teor de cálcio para aplicação em geopolímero, uma alternativa de matriz aglutinante para concreto. Os autores observaram que a alcalinidade das cinzas promoveram uma estrutura mais densa contribuindo para a resistência à compressão. Além disso, elevados teores de cinza na mistura diminuíram o tempo de pega e aumentaram a demanda de água para uma mesma consistência.

Vaske (2012) encontrou teores de álcalis de 4,34% nas cinzas volantes de madeira. Este valor está acima do preconizado em norma que é de 1,5%. Porém, conforme resultado de ensaio de RAA, as cinzas não apresentaram comportamento deletério nos produtos cimentícios analisados.

Udoeyo et al. (2006) relatam em seus estudos que a concentração de óxidos nas cinzas de madeira é de 37,8%, inferior ao limite mínimo especificado em norma, que é de 70%, para classificar um material com propriedades pozolânicas. Os autores utilizaram o cimento Portland CP I em suas misturas e, obtiveram os melhores resultados com adição de até 10% de cinza de madeira.

Abdullahi (2006) determinou a composição química das cinzas de madeira para ser usada como material de substituição parcial do cimento. A composição de óxido de ferro, óxido de alumínio e dióxido de silício encontrada foi de 62,14%, isto é, menos do que o mínimo necessário para classificação como material pozolânico, conforme BSI EN 450. Além disso, a perda ao fogo obtida foi de 27%. No entanto, o autor classificou a cinza de madeira com ligeiramente pozolânica. Os números indicam uma quantidade notável de carbono não queimado, o que reduz a atividade pozolânica.

Um estudo feito por Etiégni e Campbell (1991), encontrou pH variando de 6,0 a 13,5. Temperaturas de combustão mais elevadas promovem a redução de carbonatos e bicarbonatos e contribuem para a diminuição da alcalinidade das cinzas. Além disso, a produção de cinza de madeira diminuiu 45% quando a temperatura de combustão foi aumentada de 550 para 1100 °C. Compostos de carbonatos e bicarbonatos, especialmente CaCO_3 , são predominantes nas cinzas produzidas com temperatura de combustão abaixo de 500 °C. Em temperaturas mais elevadas, compostos de óxido, como a cal virgem, tornam-se predominantes na composição da cinza.

Vaske (2012) utilizou cinza de lenha de eucalipto que passou por processo de combustão variando entre 800 e 1200 °C. A cinza apresentou alto teor de cálcio (48,99%) na forma de calcita (CaCO_3). Os ensaios em DRX mostraram o predomínio das fases cristalinas calcita, silvita (KCl) e clorocalcita (KCaCl_3), o que indica um material de baixa atividade pozolânica. A cinza de madeira foi classificada como Resíduo perigoso – Classe I, com pH superior a 12,5%, o que lhe confere propriedade corrosiva, sugerindo a importância no processo de descarte desse resíduo. Segundo seu estudo, a cinza de eucalipto utilizada como substituição ao CP IV-32, pode ser utilizada como adição ao concreto, com efeito predominante de filler, em percentual de 15%, trazendo benefícios econômicos – menor consumo de cimento, técnicos – menor calor de hidratação e ambientais.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o calor de hidratação resulta em deformações por retração, acentuando-se em elementos

maciços de concreto. Essas deformações podem ser prejudiciais porque se manifestam em tensão de tração quando restringidas e, levando-se em conta que a resistência à tração no concreto é baixa, estruturas do material frequentemente fissuram.

Winckler (2015) estudou a caracterização de cinzas de *Pinus spp* para uso como adição em argamassa e concreto de cimento Portland, utilizando CP V-ARI-RS. De acordo com sua pesquisa, a cinza de pinus não pode ser classificada como material com atividade pozolânica, porém tem potencial de uso como adição mineral ao cimento Portland em concretos e argamassas na forma de fíler.

Observando os trabalhos já realizados, pode-se constatar a importância no desenvolvimento de estudos sobre o aproveitamento das cinzas de biomassa (CB). Observa-se também que as cinzas volantes de biomassa (CVB) são recorrentes em pesquisas, o que não acontece com a mesma frequência para as cinzas de grelha. A utilização das duas cinzas aumenta a aplicabilidade do resíduo. Entretanto e de forma geral, as adições interferem nas características e desempenho do material cimentício, por vezes os ganhos vêm acompanhados de perdas. Mesmo cinzas não classificadas como pozolanas, CVB podem ser usadas em concreto ou argamassa, uma vez que as propriedades mecânicas e durabilidade sejam atingidas. VASSILEV et al. (2010) comenta que a ampliação e melhoria dos conhecimentos básicos da biomassa, fonte geradora da cinza, composição, propriedades e desempenho final, são formas de aplicá-las de modo mais avançado e seguro. A pesquisa justifica-se como forma de buscar condições que permitam o emprego da CB de madeira em concretos e argamassas.

Sempre que houver garantia no fornecimento de produtos e homogeneidade ao longo do tempo, com qualidade assegurada, é possível misturar cinzas diretamente na betoneira através de modelos de dosagem pré-estabelecidos (JOHN, 2011).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

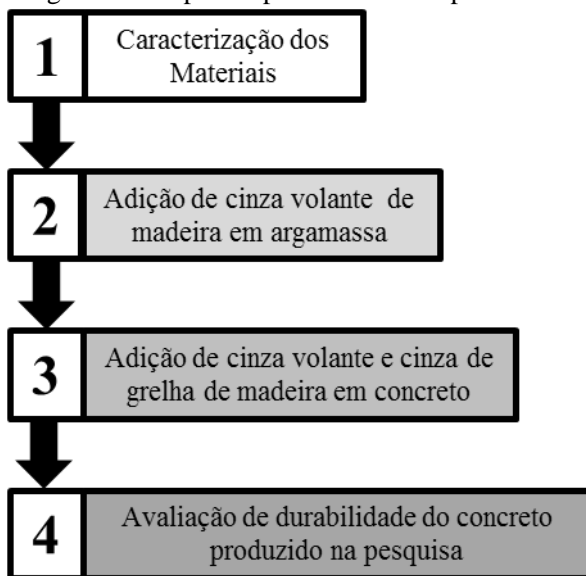
De acordo com o objetivo geral deste trabalho, foi feita a experimentação da cinza volante e cinza de grelha de madeira em argamassa e concreto, respectivamente. O projeto está voltado para a linha de pesquisa em valorização de resíduos do mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais da UNESC.

A cinza volante de madeira foi caracterizada química e fisicamente de forma a avaliar seu potencial pozolânico para ser usada como material cimentício suplementar em cimento Portland.

A cinza de grelha de madeira foi caracterizada química e fisicamente e avaliada como agregado miúdo alternativo em concreto.

O procedimento experimental foi dividido em 4 etapas principais conforme esquematizado na Figura 6.

Figura 6 – Etapas do procedimento experimental.



Fonte: O autor, 2017.

As atividades da pesquisa foram realizadas no Laboratório de Cerâmica Técnica – CerTec/UNESC. As misturas foram processadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/IDT/UNESC e no Laboratório de Valorização de Resíduos – LabValora/UNESC. As

análises foram realizadas em laboratórios do Instituto de Engenharia e Tecnologia – IDT/UNESC e nos laboratórios do Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas – IPAT/UNESC. As análises químicas por espectrometria de fluorescência de raios X foram realizadas no SENAI em Criciúma - SC.

A seguir são descritos materiais e procedimentos utilizados em cada etapa da pesquisa.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Cimento

Foram utilizados três tipos de cimento Portland no desenvolvimento deste trabalho, sendo eles: CP II-F-32, CP IV-32 e CP V-ARI.

O cimento CP II-F-32, da marca Itambé, foi utilizado no ensaio para determinação do índice de desempenho com cimento Portland (ID com cimento) aos 28 dias.

O cimento CP IV-32, da marca Votoran, foi utilizado durante os ensaios de argamassa e concreto como cimento comercial de referência.

O cimento CP V-ARI, da marca Itambé, foi utilizado nas composições com Pozolanita, cinza volante e cinza de grelha de madeira. Este tipo de cimento foi adquirido de dois lotes diferentes, sendo o primeiro usado até a etapa 2 e, o lote seguinte usado nas etapas 3 e 4 da pesquisa. A Tabela 5 mostra a caracterização dos cimentos fornecida pelo fabricante da marca Itambé.

A escolha do cimento Portland CP V-ARI para as misturas cimentícias desta pesquisa, deu-se pelo fato de sua composição não apresentar material pozolânico e um percentual máximo de 5% de material carbonático ou fíler. Por meio do resultado do resíduo insolúvel, apresentado pelo fabricante na Tabela 5, é possível verificar a predominância de clínquer neste tipo de cimento Portland.

Tabela 5 - Caracterização do CP II-F-32 e CP V-ARI.

Características	Tipo de cimento		
	CP II-F-32	CP V-ARI (lote 1)	CP V-ARI (lote 2)
CaO (%)	61,17	60,12	60,69
SiO ₂ (%)	18,87	18,87	18,94
Al ₂ O ₃ (%)	4,21	4,27	4,24
F ₂ O ₃ (%)	2,65	2,67	2,62
SO ₃ (%)	2,80	2,95	2,97
Perda ao fogo (%)	5,03	3,32	3,38
Resíduo insolúvel (%)	1,17	0,97	0,88
Equivalente alcalino (%)	0,73	0,73	0,71
Massa específica (g/cm ³)	3,08	3,09	3,09
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	43,5	52,0	52,8

Fonte: Do fabricante, 2016.

4.1.2 Pozolanita

Nas misturas de argamassa e concreto, foi inserida uma pozolana proveniente da calcinação do resíduo oriundo do beneficiamento do carvão mineral. A composição química é mostrada na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química da Pozolanita.

Composição química da Pozolanita	
Óxidos constituintes	% em massa
SiO ₂	59,76
Al ₂ O ₃	26,70
Fe ₂ O ₃	4,60
K ₂ O	1,85
Na ₂ O	0,42
CaO	1,24
MgO	1,07
SO ₃	1,04
Perda ao fogo	2,03

Fonte: LabValora, 2016.

A pozolana foi utilizada como complemento às adições de cinza volante de madeira e como material pozolânico para compor um cimento de referência interna. O material foi disponibilizado pelo Laboratório de Valorização de Resíduos - LabValora/UNESC.

A caracterização do material, fornecida pelo laboratório, é mostrada na Tabela 7.

Tabela 7 - Características da pozolana.

Propriedades da Pozolanita	
Material retido na peneira com abertura de malha 45 μm	5,70%
Tamanho médio de partícula	12,5 μm
Massa específica	2,60 g/cm^3
Área específica (BET)	8,45 m^2/g
Teor de SO_3	1,04%
Perda ao fogo	2,03%
Teor de óxidos: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	91,06%
Álcalis disponíveis em Na_2O equivalente	0,19%

Fonte: Do fabricante, 2016.

4.1.3 Cinza volante de madeira

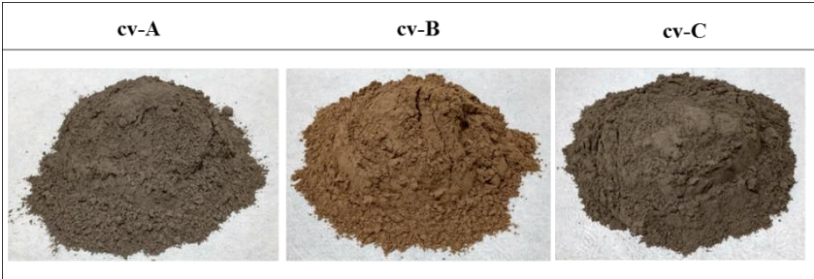
Buscou-se cinzas volantes em empresas da região, que usam madeira na forma de lenha ou cavaco para geração de energia térmica em seus processos produtivos. O processo de queima da biomassa em todas as empresas é do tipo leito fixo.

A reatividade da cinza é influenciada pela sua composição química, pelo produto que gerou a cinza, pelo solo onde a biomassa se desenvolveu, pelo processo de produção da cinza, temperatura e granulometria, entre outros (JOHN; CINCOTTO; SILVA, 2003).

Foram coletadas 3 amostras de cinzas volante produzidas e descartadas por 3 empresas de segmentos diferentes: confecção, cerâmico e alimentício. Deste ponto em diante do trabalho, as cinzas volantes serão denominadas: cv-A (cinza volante A), cv-B (cinza volante B) e cv-C (cinza volante C), respectivamente. A Figura 7 mostra o aspecto das três cinzas volantes.

A caracterização de todas as cinzas consta na 1ª Etapa no procedimento experimental.

Figura 7 – Aspecto visual das cinzas volantes: cv-A oriunda da indústria da confecção, cv-B da indústria cerâmica e cv-C da indústria alimentícia.



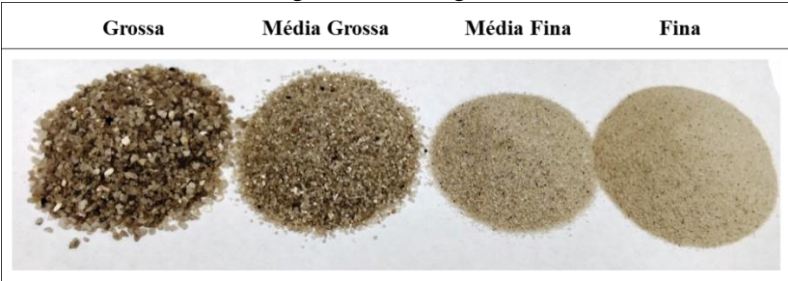
Fonte: O autor, 2017.

4.1.4 Areia normal

Em alguns ensaios foi utilizada areia normatizada adquirida junto ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). A areia atende a norma NBR 7214 (2015) sendo material de referência para ensaios de controle de qualidade dos cimentos Portland.

A areia normal brasileira, como é chamada, é dividida em 4 frações granulométricas chamadas de: grossa (retida entre as peneiras de abertura 2,4 e 1,2 mm), média grossa (entre 1,2 e 0,6 mm), média fina (entre 0,6 e 0,3 mm) e fina (retida entre 0,3 e 0,15 mm). A Figura 8 mostra as quatro frações da areia normal IPT.

Figura 8 – Aspecto visual das quatro frações da areia normal brasileira – IPT, divididas em grossa, média grossa, média fina e fina.



Fonte: O autor, 2017.

Para diferenciar a areia normatizada da areia comercial, deste ponto em diante do trabalho denominaremos a primeira com sendo “areia normal” e a segunda será chamada apenas de “areia”.

4.1.5 Areia

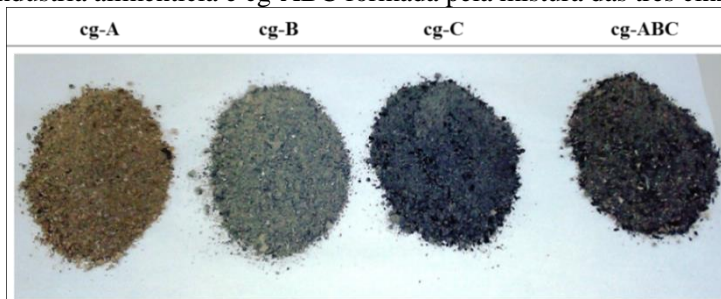
Utilizou-se agregado miúdo de origem quartzosa disponível comercialmente. A caracterização do agregado miúdo consta na 1ª Etapa no procedimento experimental.

4.1.6 Cinza de grelha de madeira

A cinza de grelha corresponde ao descarte grosseiro da cinza após a queima da biomassa. O material é recolhido em depósito abaixo das grelhas, onde ocorre a queima da madeira.

Para compor a amostra do material usado nesta pesquisa, foram recolhidas cinzas de grelha de três empresas da região denominadas de acordo com a origem em: cg-A, cg-B e cg-C. A cinza de grelha cg-A é oriunda de uma indústria de confecção; a cinza de grelha cg-B é proveniente de uma indústria cerâmica e a cg-C de uma indústria alimentícia. O material obtido cg-ABC foi formado pela mistura das três cinzas de grelha em partes iguais, sendo 1/3 (em massa) correspondente a cada cinza. A Figura 9 mostra as três cinzas obtidas e a composição usada nesta pesquisa: cg-ABC, que será usada como substituição parcial do agregado miúdo.

Figura 9 - Aspecto visual das cinzas de grelha: cg-A proveniente da indústria da confecção, cg-B oriunda da indústria cerâmica, cg-C da indústria alimentícia e cg-ABC formada pela mistura das três cinzas.



4.1.7 Brita

Na confecção dos corpos de prova de concreto foi utilizada brita basáltica.

O Basalto é uma rocha ígnea de tonalidade escura, cuja composição obedece à classificação básica (45 a 52% de sílica), formada pelo resfriamento rápido e solidificação de um magma na superfície terrestre (BRANCO, 2016).

4.2 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Esta primeira etapa do procedimento experimental compreende a preparação dos materiais, ensaios e análises.

4.2.1 Processamento das cinzas

4.2.1.1 Cinzas volantes de madeira

Após a coleta nas indústrias, as cinzas passaram pelo processo de peneiramento manual em peneira de malha 30 mesh (600 μm). O objetivo desta atividade foi a remoção de partículas com tamanho superior e uniformização das amostras.

Em seguida, as cinzas foram acondicionadas em jarros de porcelana, juntamente com bolas de alta alumina, e submetidas à moagem a seco em um moinho tipo gira-jarros. O critério para o final da moagem se deu por meio da análise do resíduo retido em peneira de malha 325 mesh (45 μm), objetivando-se obter resíduo inferior a 20%.

O processo de cominuição de materiais cimentícios e adições minerais, mesmo sendo uma operação dispendiosa, é necessária para ativar as reações químicas, cujas taxas são diretamente proporcionais à superfície específica do material e inversamente ao tamanho das partículas (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009).

A NBR 12653 (2014) estabelece resíduo < 20% retido na peneira com malha de 325 mesh (45 μm) como requisito físico para uma pozolana.

O material obtido foi acondicionado em sacos e usado nas misturas conforme as composições.

Os ensaios de caracterização não foram aplicados a todas as cinzas coletadas. Dependendo dos resultados obtidos durante a caracterização, excluía-se a cinza volante que não apresentava potencial

para ser aplicada como uma pozolana. De acordo com Aitcin (2000), as adições minerais necessitam ter finura e granulometria adequadas e ainda devem ser bem conhecidas as suas características físicas e químicas.

A Tabela 8 mostra um resumo de quais ensaios foram aplicados a cada cinza coletada.

Tabela 8 – Tipo de caracterização realizada nas três cinzas volantes utilizadas na pesquisa: cv-A (cinza volante proveniente da indústria da confecção), cv-B (oriunda da indústria cerâmica) e cv-C (cinza volante da indústria alimentícia).

Ensaio e análises	Tipo de cinza volante		
	cv-A	cv-B	cv-C
FRX	Sim	Sim	Sim
Massa específica	Sim	Sim	Sim
IAP à cal	Sim	Sim	Sim
IAP com cimento	Sim	Sim	Sim
DRX	Não	Sim	Sim
Granulometria	Não	Sim	Sim
Superfície específica	Não	Sim	Não
Lixiviação e solubilização	Não	Sim	Não
Álcalis disponíveis	Não	Sim	Não
Análise cloretos	Não	Sim	Não

Fonte: O autor, 2017.

4.2.1.2 Cinzas de grelha de madeira

Após a coleta nas indústrias, as cinzas passaram pelo processo de peneiramento manual apenas para retirar pregos e pequenos pedaços de madeira que não queimaram, entre outros.

As cinzas das três empresas apresentavam granulometria diferente. Para que fossem aplicadas como agregado miúdo, foram processadas em um britador de mandíbula e, após, em curto período (aproximadamente 1 h) no moinho gira-jarros até se obter o aspecto apresentado na Figura 9.

O material usado nesta pesquisa (cg-ABC) é uma composição, em partes iguais, das cinzas de grelha coletadas nas três fontes produtoras: empresa A, empresa B e empresa C.

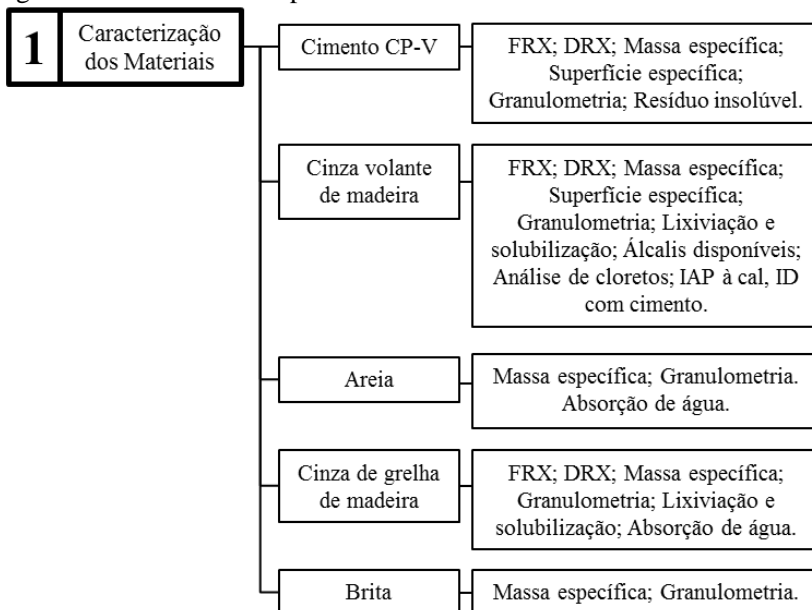
As cinzas de grelha foram submetidas aos mesmos ensaios, os quais foram feitos em agregados miúdos naturais, de acordo com norma NBR 7211 (2009). É importante ressaltar que a norma não se aplica a agregados obtidos por processos industriais como subprodutos ou materiais reciclados.

Segundo John e Ângulo (2003), deve-se evitar submeter os resíduos aos requisitos técnicos normativos ou tradicionais. A normatização tradicional pode servir como ponto de partida, porém na prática se revela limitante e restritiva.

4.2.2 Ensaios e análises

A Figura 10 mostra as análises e ensaios realizados para cada material.

Figura 10 - Ensaios da Etapa 1.



Fonte: O autor, 2017.

4.2.2.1 Fluorescência de raios X (FRX)

É um método de análise qualitativa e quantitativa da composição elementar, pela excitação de átomos e detecção de seus raios X característicos (BRUKER, 2016).

Com a caracterização por fluorescência de raios X, buscou-se identificar a composição química dos materiais, sendo este um dos requisitos para a caracterização de uma pozolana.

A análise foi realizada em equipamento da marca Panalytical, modelo WRFDX AXIOS MAX, no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais – LDCM/SENAI.

4.2.2.2 Difração de raios X (DRX)

A difração de raios X foi usada por ser uma forma de caracterizar ou identificar as fases presentes nos materiais (BRUNDLE, 1992). Difractogramas típicos de pozolanas reativas apresentam um halo característico de material amorfo. A estrutura amorfa torna uma pozolana reativa com os produtos hidratados do cimento, gerando benefícios ao concreto quando a ele incorporadas (HOPPE, 2008).

Foi utilizado um difratômetro da marca Shimadzu, modelo XRD 6000, com radiação incidente $\text{CuK}\alpha$ (1,5406 Å), em um intervalo de leitura de 3 a 80° (2 θ) e velocidade de 2°/min.

Os ensaios foram executados no Laboratório de Caracterização de Materiais pertencente ao IDT/UNESC.

4.2.2.3 Massa específica

A determinação da massa específica das cinzas volantes e do cimento foi realizada no Laboratório de Cerâmica Técnica – CerTec/UNESC, em picnômetro da marca Quantachrome Instruments, modelo ULTRAPYC 1200e.

A massa específica e a massa unitária da areia e da cinza de grelha de madeira foram determinadas de acordo com procedimento da norma NBR NM 52 (2009) e NBR NM 45 (2006), respectivamente.

A massa específica do agregado graúdo foi feita de acordo com procedimento da norma NBR NM 53 (2009).

4.2.2.4 Superfície específica

A superfície específica foi obtida por adsorção de gás acoplado com a teoria de BET, equipamento modelo NOVA 1200e, fabricado pela Quantachrome Instruments. O ensaio foi realizado no Laboratório de Valorização de Resíduos – LabValora/UNESC.

As amostras passaram por um processo de desgaseificação para eliminar possíveis obstruções ou umidade adsorvida na superfície da partícula. Após, foram conduzidas à condição de temperatura constante em banho com nitrogênio líquido e submetidas à pressão com nitrogênio gasoso, no qual as moléculas de nitrogênio são adsorvidas pela superfície da partícula.

A quantidade de área disponível em um material, muitas vezes está ligada ao desempenho quanto à interação com seu ambiente de aplicação final (QUANTACHROME, 2016).

4.2.2.5 Granulometria (*Tamanho de partícula*)

A distribuição granulométrica (por tamanho de partícula) do cimento e das cinzas volantes foram identificadas por difração a laser em analisador de tamanho de partículas da marca Cilas, modelo PSA 1064. As análises foram executadas no Laboratório de Caracterização de Materiais pertencente ao IDT/UNESC.

A granulometria dos agregados miúdo, graúdo e da cinza de grelha foi determinada de acordo com a norma NBR NM 248 (2003).

A distribuição granulométrica de um material em misturas de argamassa ou concreto, possivelmente interfere na trabalhabilidade final do produto obtido.

4.2.2.6 Resíduo insolúvel

Dentre os compostos das matérias-primas do clínquer, apenas o calcário é dissolvido em ácido clorídrico, sendo que a sílica, a alumina e o óxido de ferro não o são. Entretanto, após o processo de clínquerização, estes compostos combinados são solúveis no ácido (COUTINHO, 2002).

Caso a combinação das matérias-primas fosse perfeita, todo o clínquer seria solúvel em ácido. Em cimentos bem cozidos a porcentagem de resíduo insolúvel não excede a 1% (COUTINHO, 2002).

O resíduo insolúvel foi determinado por meio do ataque com ácido clorídrico, conforme a NBR NM 15 (2012). A NBR 5733 (1991) fixa o limite de 1,0% de resíduo insolúvel, sobre a massa do cimento, para cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Valorização de Resíduos – LabValora/UNESC.

O objetivo deste ensaio foi verificar a quantidade de resíduo insolúvel presente no cimento usado nesta pesquisa.

4.2.2.7 Lixiviação e solubilização

O ensaio de lixiviação e solubilização foi realizado no Laboratório de Resíduos Sólidos do IPAT/UNESC.

Os ensaios seguiram as normas NBR 10005 (2004) e NBR 10006 (2004).

Este ensaio objetivou a classificação dos resíduos empregados no concreto de acordo com norma NBR 10004 (2004) e, posterior avaliação quanto ao encapsulamento dos mesmos no material cimentício obtido.

4.2.2.8 Álcalis disponíveis

O ensaio obedeceu a norma NBR NM 25 (2003) – Materiais pozolânicos: determinação do teor de álcalis disponíveis.

Neste ensaio busca-se determinar o teor de álcalis liberados pelos materiais pozolânicos quando em reação com o hidróxido de cálcio.

Durante o procedimento, a amostra fica em solução com o hidróxido de cálcio por um período de 28 dias em estufa com temperatura de $38 \pm 4^\circ\text{C}$. Ao final deste período, a amostra é filtrada e neutralizada com ácido clorídrico. Após, são preparadas as soluções para leitura por absorção atômica.

O ensaio foi executado no Laboratório de Valorização de Resíduos – LabValora/UNESC e as leituras feitas em equipamento modelo AA240F5, marca Varian, do Laboratório de Absorção Atômica do IPAT/UNESC.

A NBR 12653 (2012) fixa o limite de 1,5% de álcalis disponíveis em um material pozolânico.

4.2.2.9 Análise de cloretos

O ensaio obedeceu a norma NBR 9917 (2009) – Agregados para concreto: determinação de sais solúveis, cloretos e sulfatos.

O ensaio foi realizado pelo Laboratório de Resíduos Sólidos no IPAT/UNESC.

A norma NBR 12655 (2015) fixa o teor máximo de íons cloreto, em estruturas de concreto armado, em 0,30% sobre a massa de cimento.

4.2.2.10 Índice de atividade pozolânica à cal – IAP à cal

Os materiais pozolânicos, naturais ou artificiais, devem ser potencialmente hidráulicos. Em contato com uma solução alcalina, reagem formando produtos hidratados hidráulicos, característica denominada atividade pozolânica (CINCOTTO, 2011).

O ensaio seguiu as premissas da norma NBR 5751 (2012) – Materiais pozolânicos: determinação da atividade pozolânica.

A confecção dos corpos de prova (cps) foi realizada no Laboratório de Valorização de Resíduos – LabValora/UNESC. Os ensaios de resistência à compressão foram feitos no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/IDT/UNESC.

Foram preparados 6 cps de argamassa cilíndricos 5,0 cm x 10,0 cm para cada cinza volante a ser analisada. O quantitativo dos materiais usados é mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Quantitativo dos materiais para o ensaio de IAP à cal.

Tipo de Cinza volante	Materiais (g)			
	Hidróxido de cálcio	Areia normal	Cinza volante	Água
cv-A	208,0	1872,0	515,09	382,5
cv-B	208,0	1872,0	482,74	432,0
cv-C	208,0	1872,0	494,55	420,0
cv-B + cv-C	208,0	1872,0	488,64	423,2

Fonte: O autor, 2017.

A argamassa foi preparada com uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio e mais uma quantidade de material pozolânico correspondente ao dobro do volume do hidróxido de cálcio (Equação 1).

$$M_{\text{poz}} \text{ (g)} = 2 \times (\delta_{\text{poz}} / \delta_{\text{cal}}) \times 104 \quad (1)$$

Onde:

M_{poz} = material pozolânico em gramas;

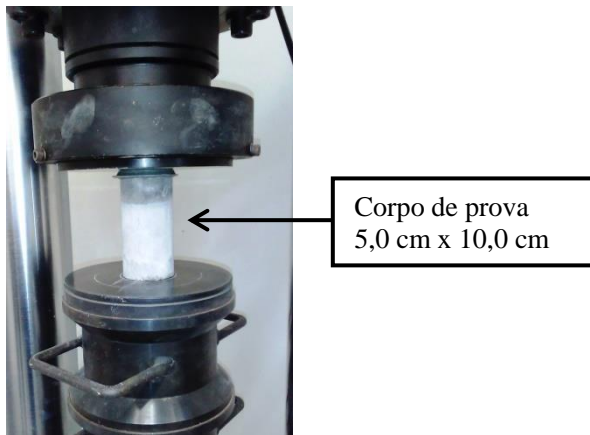
δ_{poz} = massa específica do material pozolânico;

δ_{cal} = massa específica da cal hidratada.

A quantidade de água usada para cada mistura, conforme a NBR 7215 (1997), correspondeu à obtenção de um índice de consistência de 225 ± 5 mm, obtido no ensaio de abatimento.

Os cps passaram por processo de cura inicial a uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ durante as primeiras 24 h. Subsequentemente, foram mantidos à temperatura de $55 \pm 2^\circ\text{C}$ por mais 144 h. Decorridos 7 dias, os mesmos foram capeados com enxofre e submetidos ao ensaio de resistência à compressão (Figura 11).

Figura 11 – Fotografia mostrando um corpo de prova de argamassa, submetido ao ensaio de resistência à compressão mecânica.



Fonte: O autor, 2017.

Na NBR 12653 (2012) consta como propriedade física requerida para uma pozolana um IAP à cal $\geq 6,0$ MPa aos 7 dias.

4.2.2.11 Índice de desempenho com cimento – ID com cimento

Para este ensaio seguiu-se o procedimento da NBR 5752 (2014) – Materiais pozolânicos: determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.

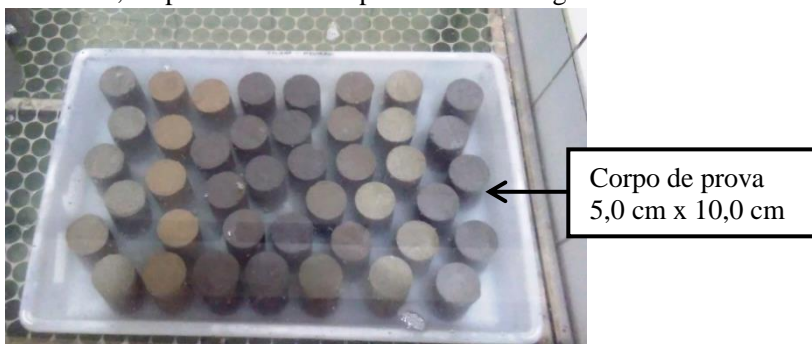
O ensaio foi conduzido no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/IDT/UNESC.

Foram preparados 6 cps de argamassa cilíndricos 5,0 cm x 10,0 cm para cada cinza volante a ser analisada (cv-A, cv-B e cv-C), para a argamassa de referência (cimento Portland CP II-F-32) e para a mistura das cinzas volantes B e C.

Os cps passaram por processo de cura inicial, nos moldes, a temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ durante as primeiras 24 h. Após, foram curados por imersão em água saturada com cal (Figura 12).

A coesão de uma pasta de cimento hidratado é favorecida pela solução em hidróxido de cálcio (LESKO et al., 2001). Decorridos 28 dias da moldagem, os cps foram capeados com enxofre e submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

Figura 12 – Fotografia mostrando corpos de prova de argamassa, confeccionados para o ensaio de índice de desempenho com cimento Portland, no processo de cura por imersão em água saturada com cal.



Fonte: O autor, 2017.

Na NBR 12653 (2014), consta como propriedade física requerida para uma pozolana, a resistência mínima de 90% em relação à argamassa de referência.

4.2.2.12 Absorção de água

O ensaio de absorção de água para o agregado miúdo (areia e cinza de grelha) foi conduzido no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/IDT/UNESC, conforme procedimento da norma NBR NM 30 (2001).

Para o agregado graúdo, utilizou-se a norma NBR NM 53 (2009).

A absorção de água dos agregados, assim como a massa específica, influencia nas propriedades do concreto fresco e endurecido (ÂNGULO; JOHN, 2002).

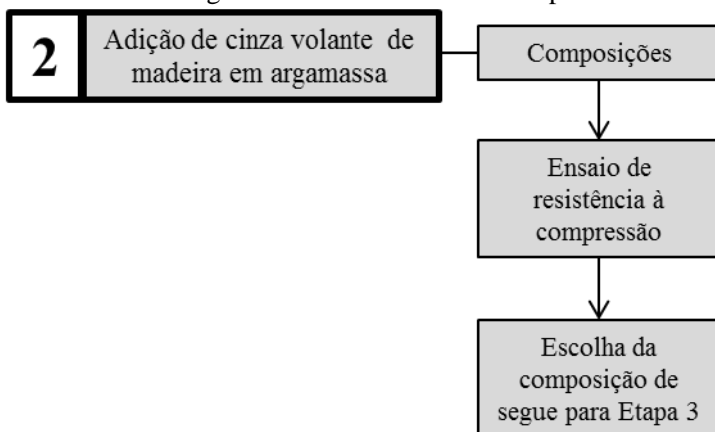
Ao final de toda a caracterização dos materiais, realizada nesta etapa do procedimento experimental, com relação a cinza volante, a cv-B apresentou os melhores resultados para ser usada como SCM em misturas com cimento Portland. Portanto, para a etapa seguinte será usada apenas a cinza volante de madeira B.

4.3 ETAPA 2: ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE DE MADEIRA EM ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND

A segunda etapa do procedimento experimental compreende a preparação das composições com cinza volante de madeira e ensaio de resistência à compressão em cps de argamassa.

A Figura 13 mostra o procedimento adotado nesta etapa.

Figura 13 - Procedimento da Etapa 2.



Fonte: O autor, 2017.

Na determinação da resistência à compressão das composições com pozolana, cinza volante de madeira e cimento Portland foi usada como referência à norma NBR 7215 (1997).

A resistência à compressão em concretos é uma característica mecânica, definida em projeto como fundamental para que a estrutura atenda aos requisitos de segurança sob o ponto de vista estrutural. Essa resistência deve estar associada a um nível de confiança de 95% (HELENE; ANDRADE, 2007).

De acordo com Neville (1997), a resistência mecânica do cimento é a propriedade mais importante em termos de utilização estrutural, tendo em vista que todas as normas fixam valores mínimos desta característica.

O procedimento do ensaio compreende a moldagem e determinação da resistência à compressão de cps cilíndricos 5,0 cm x 10,0 cm.

De acordo com o resultado das caracterizações, obtidas na etapa anterior e, a metodologia da norma, foram determinadas as composições de argamassa, na proporção 1:3 (aglomerante: agregado miúdo) em massa. A Tabela 10 mostra os tipos e percentuais usados de cimento Portland, Pozolanita e cinza volante de madeira de acordo com cada mistura. A quantidade de areia e água foi constante para todas as argamassas.

Tabela 10 - Misturas de argamassa usando a fração adição mineral composta de Pozolanita e cinza volante “B”.

Nome da argamassa	Materiais			
	CP IV-32 (%)	CP V-ARI (%)	Pozolanita (%)	Cinza volante (%)
Ref. comercial	100	-	-	-
Ref. interna	-	50	50	-
Com 17% cv-B	-	50	33	17
Com 33% cv-B	-	50	17	33
Com 50% cv-B	-	50	-	50

Fonte: O autor, 2017.

Sendo o cimento CP IV aquele que pode receber o maior percentual de material pozolânico (de 15 a 50%), escolheu-se este tipo de cimento Portland como referência comercial (Ref. comercial).

A Pozolanita, produzida pelo LabValora, foi utilizada como referência/padrão interno (Ref. interna) além de compor as misturas com a cinza volante de madeira.

As composições desta pesquisa apresentam teor máximo de substituição do cimento Portland por adição mineral o valor de 50%, de acordo com o cimento de referência. O cimento CP V-ARI não possui pozzolana em sua composição original, porém pode apresentar até 5% de filler. Por este motivo, utilizou-se o CP V-ARI como cimento base para compor o cimento pozzolânico proposto.

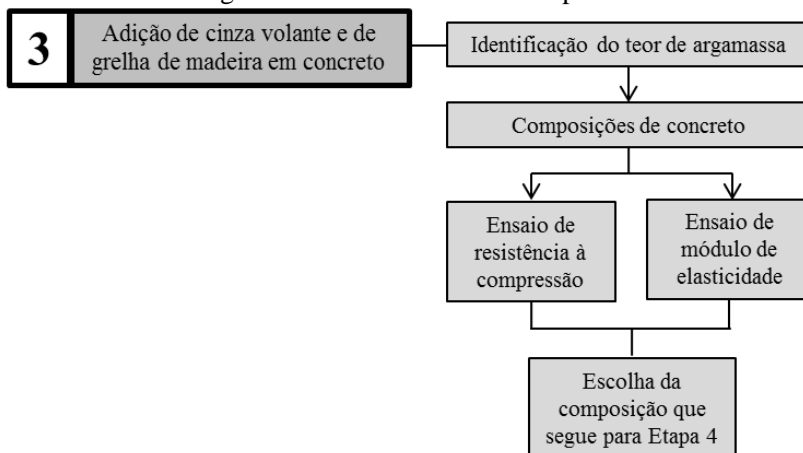
Foram confeccionados 6 cps para cada composição e capeados com argamassa de enxofre para serem rompidos nas idades de 28 e 91 dias. O ensaio de resistência à compressão foi executado em prensa modelo PC200CS/2000 kN, da marca Emic, com velocidade de carregamento de 0,55 MPa/s. As misturas e ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/IDT/UNESC.

A partir dos resultados de resistência à compressão obtidos nesta etapa, escolheu-se a composição do aglomerante que foi usada na etapa seguinte.

4.4 ETAPA 3: ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE E CINZA DE GRELHA EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

A Figura 14 mostra o procedimento adotado nesta terceira etapa.

Figura 14 - Procedimento da Etapa 3.



Fonte: O autor, 2017.

Após definição da composição do aglomerante, buscou-se identificar o teor de argamassa ideal para a mistura e o percentual de substituição do agregado miúdo por cinza de grelha no concreto.

4.4.1 Teor de argamassa

O objetivo de determinar o teor ideal de argamassa na mistura do concreto, segundo Helene e Terzian (1992), reside no fato de que a falta de argamassa na mistura acarreta porosidade no concreto ou falhas de concretagem. O contrário, leva a um concreto de melhor aparência, mas aumenta o custo e o risco de fissuração.

Para atender às condições de durabilidade do concreto, em função da classe de agressividade do meio, uma relação água/cimento (a/c) $\leq 0,55$ (em massa) é um requisito para obter peças de concreto armado resistentes à exposição das intempéries, em atmosfera urbana ou rural (NBR 6118, 2014).

Sendo assim, o estudo de dosagem procurou manter a relação água/cimento menor do que o valor mencionado em norma.

O teor ideal de argamassa foi definido conforme o método apresentado no livro Manual de Dosagem e Controle do Concreto, dos autores Paulo Helene e Paulo Terzian (1992).

Todo o procedimento é realizado com os materiais dosados em massa, sendo corrigido para volume apenas no final do processo, quando o concreto tiver que ser produzido em um canteiro de obras.

O procedimento se inicia com a imprimação da betoneira com argamassa no traço 1:5,0 (cimento: agregados) e relação a/c igual a 0,65. Em seguida, a argamassa excedente foi retirada da betoneira e foram inseridos 30,0 kg de agregado graúdo igual ao material usado nesta pesquisa.

Após, foram realizados acréscimos sucessivos de cimento, areia e água (argamassa), conforme mostrado na Tabela 11.

O aglomerante usado na definição do teor ideal de argamassa foi o mesmo escolhido na etapa 2 desta pesquisa, com adição de cinza volante de madeira e pozolana. O agregado miúdo usado foi composto totalmente por areia.

Tabela 11 - Determinação do teor ideal de argamassa.

Teor (%)	Traço Unitário (cimento: areia: brita)	Quantidade de Areia (kg)		Quantidade de Cimento (kg)		Quantidade de Água (kg)	
		Massa Total	Adic.	Massa Total	Adic.	Massa Total	Adic.
35	1: 1,10: 3,90	8,46		7,69		3,85	
			1,22		0,250		0,125
37	1: 1,22: 3,78	9,68		7,94		3,97	
			1,31		0,260		0,130
39	1: 1,34: 3,66	10,99		8,2		4,10	
			1,37		0,27		0,135
41	1: 1,46: 3,54	12,36		8,47		4,24	
			1,50		0,30		0,15
43	1: 1,58: 3,42	13,86		8,77		4,39	
			1,59		0,32		0,16
45	1: 1,70: 3,30	15,45		9,09		4,55	
			1,72		0,34		0,17
47	1: 1,82: 3,18	17,17		9,43		4,72	
			1,85		0,37		0,185
49	1: 1,94: 3,06	19,02		9,80		4,90	
			2,00		0,40		0,2
51	1: 2,06: 2,94	21,02		10,20		5,10	

Fonte: O autor, 2017.

Após este procedimento, o teor de argamassa, traço unitário e relação a/c ficaram estabelecidos.

4.4.2 Composições do concreto com cinza de grelha

Definido o percentual de adição de cinza volante de madeira (obtido na etapa 2), a argamassa ou concreto com adições de cinzas de madeira deste ponto em diante do trabalho será chamado de “Pesquisa”

Foram formuladas argamassas e concretos com substituição da areia/agregado em 10, 20 e 30% por cinza de grelha de madeira.

Também foram produzidos argamassas e concretos de referência, com agregado miúdo natural. Foram confeccionados 8 cps para cada composição e rompidos na idade de 28 dias.

As quantidades de materiais usados encontram-se na Tabela 12. A quantidade de água em cada mistura foi 3,01 kg, referente a uma relação a/c igual a 0,5.

Verifica-se na Tabela 12, que a quantidade de cinza de grelha não corresponde à quantidade da areia em massa. Este ajuste se fez necessário, pois o método de substituição em massa levou a mudanças no volume da argamassa devido à diferença entre as massas unitárias da areia e da cinza de grelha. A massa unitária da areia é aproximadamente o dobro da massa unitária da cinza de grelha.

Conforme definido anteriormente, a relação a/c não poderia ser maior do que 0,55. Como consequência, em ensaios preliminares ficou estabelecido o máximo de adição de cinza de grelha com a qual o concreto pudesse ser moldado, sem o uso de maior quantidade de água ou qualquer plastificante.

Tabela 12 - Quantidades de materiais para cps concreto.

Concreto	Quantidade de materiais (kg)						
	CP IV-32	CP V-ARI	Pozolanita	Cinza volante de madeira	Areia	Cinza de grelha	Brita
Referência comercial	6,02	-	-	-	12,40	-	17,69
Referência interna	-	3,01	3,01	-	12,40	-	17,69
Pesquisa	-	3,01	2,01	1,00	12,40		17,69
Pesquisa com 10% cg-ABC	-	3,01	2,01	1,00	11,16	0,62	17,69
Pesquisa com 20% cg-ABC	-	3,01	2,01	1,00	9,92	1,24	17,69
Pesquisa com 30% cg-ABC	-	3,01	2,01	1,00	8,68	1,86	17,69

Fonte: O autor, 2017.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade (Figura 15) em máquina universal de ensaios mecânicos modelo PC200 da marca Emic. As misturas e ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/IDT/UNESC.

Figura 15 – Fotografia mostrando (a) ensaio de compressão e (b) ensaio de módulo de elasticidade em corpo de prova de concreto.



Fonte: O autor, 2017.

A partir dos resultados de resistência à compressão obtidos nesta etapa, escolheu-se a composição de concreto com cinza de madeira que foi utilizada para a realização dos ensaios de durabilidade.

O módulo de elasticidade, obtido por meio de leitura em extensômetros acoplados ao corpo de prova, foi utilizado apenas para análise complementar.

4.5 ETAPA 4: AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DO CONCRETO COM CINZA VOLANTE E CINZA DE GRELHA DE MADEIRA

A NBR 6118 (2014) – Projeto de estruturas de concreto: procedimento, apresenta dois capítulos específicos sobre durabilidade. A NBR 12655 (2015) complementa informações sobre o tema abordando subitens como sulfatos e cloretos em concretos.

Durante os ensaios de durabilidade, as variáveis composicionais não serão modificadas. Os ensaios foram utilizados para comparar o desempenho de uma argamassa ou concreto de referência e a formulação de melhor desempenho mecânico obtida neste trabalho, a partir da incorporação de resíduos de madeira.

Os ensaios e a metodologia aplicada a cada procedimento estão relacionados abaixo.

4.5.1 Absorção de água

Busca-se por meio deste ensaio verificar a influência da adição das cinzas de madeira na absorção de água em concreto endurecido. As medições de absorção comumente são indicadores indiretos da durabilidade (LESSARD et al., 2017).

Foram moldados 6 cps cilíndricos 10 cm x 20 cm, sendo 3 de concreto Referência e 3 de concreto Pesquisa. Os cps foram mantidos nos moldes durante as primeiras 24 h e após foram submetidos à cura em água saturada com cal até a idade de 28 dias.

O ensaio foi executado no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/IDT/UNESC, de acordo com a NBR 9778 (2009). Por meio do ensaio de absorção de água, foram obtidos valores de massa específica e massa específica aparente, sendo que a primeira não considera os poros permeáveis à água e a segunda inclui os poros em uma relação entre massa e volume.

4.5.2 Absorção de água por capilaridade

Realizado conforme a norma NBR 9779 (2012), o ensaio de absorção de água por capilaridade foi conduzido no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/IDT/UNESC.

Foram moldados e ensaiados 3 cps cilíndricos de 10 cm x 20 cm de concreto Referência e 3 cps de concreto Pesquisa. Com este ensaio, é possível identificar a altura da ascensão capilar de água em concreto endurecido.

4.5.3 Ataque por sulfato

O procedimento do ensaio consta na norma NBR 13583 (2014) – Cimento Portland: Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Porém, foram necessários alguns ajustes tais como: moldagem de 3 barras para cada composição, ao invés de 4, devido a limitação de moldes no laboratório; na argamassa Referência foi usada areia comum, ao invés da areia normal. O mesmo ocorreu para a argamassa Pesquisa, onde foi usada areia comum com a cinza de grelha no lugar da areia normal. O objetivo de uso do mesmo agregado, avaliado durante os ensaios de resistência, é verificar o comportamento deste frente ao ataque pela solução de sulfato.

O ensaio foi realizado no LMCC/IDT/UNESC, onde foram moldadas 12 barras de argamassa com medidas correspondentes a 25 mm x 25 mm x 285 mm. A composição das argamassas submetidas ao ensaio é mostrada na Tabela 13.

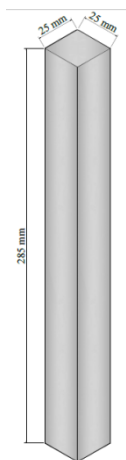
Tabela 13 – Composição das argamassas, em porcentagem mássica, para ensaio de ataque por sulfato.

Tipo de argamassa	Composição da Argamassa						A/C
	CP IV-32 (%)	CP-V (%)	Pozolanita (%)	cv-B (%)	Areia (%)	cg-ABC (%)	
Referência	100	-	-	-	100	-	0,6
Pesquisa	-	50	33	17	70	30	0,6

Fonte: O autor, 2017.

Conforme a referida norma, o procedimento de cura é dividido em 3 etapas: cura inicial ao ar, cura intermediária em solução de água saturada com cal (Figura 16) e 3 cura final em solução agressiva de sulfato de sódio e solução de água saturada com cal.

Figura 16 – Fotografia mostrando (a) dimensões de uma barra de argamassa e (b) barras de argamassa em cura intermediária



(a)



(b)

Fonte: O autor, 2017.

Inicialmente, as 12 barras de argamassa moldadas foram submetidas à cura inicial ao ar durante 2 dias. Após, todas as barras foram submersas em água saturada com cal, onde permaneceram por 12 dias. Para cura final, 3 barras de argamassa do tipo *referência* continuaram na cura em água saturada com cal, porém em estufa à temperatura de $40 \pm 2^\circ\text{C}$ e, as outras 3 barras de argamassa do tipo *referência* foram submetidas a cura em solução agressiva de sulfato de sódio, igualmente em estufa. A cura final teve duração de 42 dias. As barras de argamassa do tipo *pesquisa* tiveram a mesma distribuição quanto ao tipo de cura final, sendo 3 destinadas a cura em solução de água saturada com cal e 3 para cura em solução de sulfato de sódio. A distribuição do tipo de argamassa em cada processo de cura é mostrada na Tabela 14.

Tabela 14 - Tipo de cura dos corpos de prova.

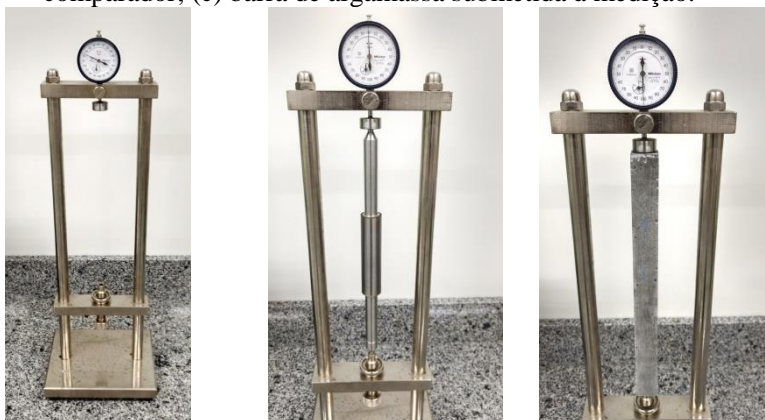
Argamassa	Cps em cada etapa de cura (barras de argamassa)			
	Cura inicial ao ar	Cura intermediária em solução saturada com cal	Cura final em solução saturada com cal	Cura final em solução de sulfato de sódio
Referência	6	6	3	3
Pesquisa	6	6	3	3

Fonte: O autor, 2017.

O ataque por sulfato é mensurado por meio da expansão individual das barras de argamassa. As medições foram realizadas com relógio comparador com resolução de 0,001 mm.

A Figura 17 mostra o aparato utilizado, incluindo o relógio comparador, onde as barras foram medidas na condição vazia, com a barra de calibração, e a barra de argamassa sendo medida.

Figura 17 – Fotografia mostrando (a) relógio comparador e aparato para medição; (b) barra de aferição usada para zerar o relógio comparador; (c) barra de argamassa submetida à medição.



(a)

(b)

(c)

Fonte: O autor, 2017.

4.5.4 Reação álcali-agregado

O ensaio permite determinar, por meio da variação do comprimento de barras de argamassa, a suscetibilidade de um agregado participar da reação expansiva álcali-sílica (NBR 15577-4, 2009). O ensaio foi executado no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/IDT/UNESC.

A metodologia do ensaio seguiu o procedimento descrito na NBR 15577-4 (2009) – Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado e NBR 15577-5 (2009) - Reatividade álcali-agregado Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.

Foram moldadas 6 barras de argamassa com medidas de 2,5 cm x 2,5 cm x 285 cm, sendo 3 barras com cimento padrão (CP V-ARI) e 3 barras com cimento Pesquisa (CP V-ARI + pozolana + cv-B). Ambas as argamassas receberam como agregado miúdo a composição de areia e cinza de grelha, conforme Tabela 15.

Tabela 15 - Composição das barras de argamassa, em porcentagem de massa, para RAA.

Argamassa	Quant. cps	Composição da Argamassa					A/C
		CP V-ARI (%)	Pozolanita (%)	Cinza volante (%)	Areia (%)	Cinza grelha (%)	
Referência	3	100	-	-	70	30	0,47
Pesquisa	3	50	33	17	70	30	0,47

Fonte: O autor, 2017.

Após a moldagem, as barras permaneceram nos moldes por um período de 24 h com a face superior coberta para evitar a perda de umidade. Em seguida, foram identificadas e retiradas dos moldes, fazendo-se uma primeira leitura no comprimento das mesmas. Na etapa de cura posterior, as barras foram colocadas em recipiente com água e levadas para a estufa, sofrendo aquecimento gradativo até atingir 80 °C, onde permaneceram pelo período de 24 h. Ao final desta etapa, foi realizada uma nova leitura no comprimento das barras, sendo considerada a leitura zero.

Decorridas 48 h, após a moldagem das barras, elas foram colocadas em solução com hidróxido de sódio em estufa a temperatura de 80 °C, onde permaneceram por 28 dias. O hidróxido de sódio acelera a reação álcali-sílica.

Após a leitura zero, foram efetuadas leituras nas idades de 16 dias e 30 dias, contados a partir da moldagem e 3 leituras intermediárias em cada período.

4.5.5 Desgaste por abrasão

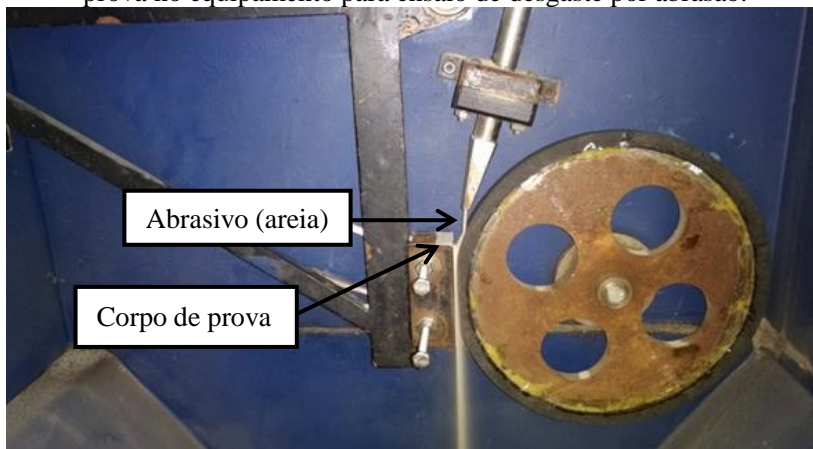
Fricção constante, esfregamento, enrolamento ou escorregamento causam desgaste superficial em concretos e argamassas (BAUER et al., 2002).

Este ensaio objetivou verificar se há diferença entre o desgaste por abrasão na argamassa com cinza de madeira em relação à argamassa de referência.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Fenômenos de Superfície e Tratamentos Térmicos LAFEN/IDT/UNESC em equipamento conforme consta na norma ASTM G65 (2016) – Standard

test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. A Figura 18 mostra o aparato utilizado no ensaio.

Figura 18 – Fotografia mostrando o posicionamento do corpo de prova no equipamento para ensaio de desgaste por abrasão.



Fonte: O autor, 2017.

O abrasivo utilizado é uma areia de quartzo de grãos arredondados, seca, passante na peneira de malha 48 mesh ($300\ \mu\text{m}$) e retida na peneira de malha 65 mesh ($212\ \mu\text{m}$). A areia utilizada no ensaio não pode ser reutilizada, pois apresenta impurezas que podem afetar o resultado.

A carga aplicada ao corpo de prova foi de 66 N e a abrasão linear correspondeu a uma distância de aproximadamente 1000 m. Esses parâmetros foram extraídos da norma NBR 12042 (2012), que determina o desgaste por abrasão de materiais inorgânicos.

A taxa utilizada de escoamento da areia foi de 350 g/min. Foram moldados 4 cps com cada composição de argamassa, totalizando 8 cps com medidas de 15 mm x 8 mm x 30 mm.

Os resultados foram expressos em perda de massa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho são apresentados e discutidos nos itens subsequentes.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 Cimento CP V-ARI

A caracterização do cimento CP V-ARI teve como objetivo a equiparação com os resultados apresentados no laudo fornecido pelo fabricante, além do conhecimento das características não informadas. Na Tabela 16 são apresentados os resultados.

Tabela 16 - Caracterização do cimento CP V-ARI.

Características	CP V-ARI (lote I)	
	Dados do fabricante	Ensaios realizados durante a pesquisa
CaO (%)	60,12	61,12
SiO ₂ (%)	18,87	19,23
Al ₂ O ₃ (%)	4,27	4,34
F ₂ O ₃ (%)	2,67	2,88
SO ₃ (%)	2,95	2,73
Perda ao fogo (%)	3,32	3,23
Resíduo insolúvel (%)	0,97	1,60
Equivalente alcalino (%)	0,73	0,87
Massa específica (g/cm ³)	3,09	3,11
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	52,0	42,3
Superfície específica – BET (m ² /g)	-	1,567
Tamanho de partícula D50 (µm)	-	14,72

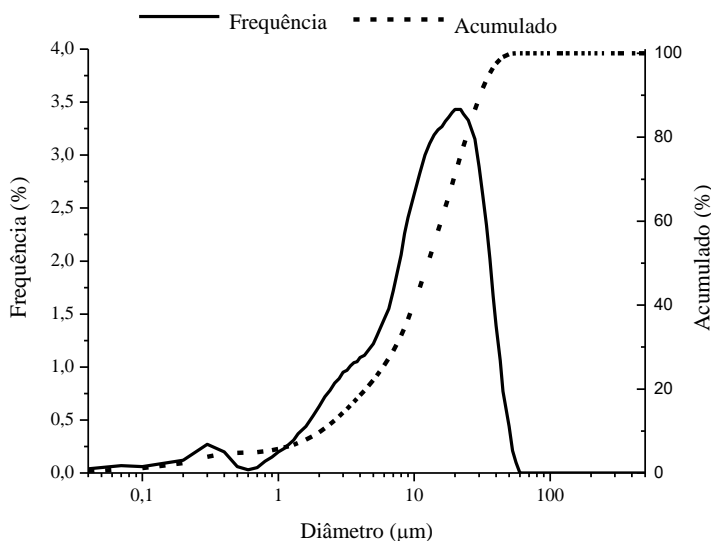
Fonte: O autor, 2017.

Diferenças significativas foram encontradas no parâmetro resíduo insolúvel e resistência à compressão aos 28 dias. Com relação ao resíduo insolúvel, o ensaio realizado nesta pesquisa não contemplou o ensaio em branco e a repetitividade. Esses fatos podem ter corroborado com a diferença no resultado da caracterização.

A NBR 5733 (1991) não estabelece um valor mínimo de resistência à compressão aos 28 dias, para o cimento Portland CP V-ARI, consta apenas que a resistência à compressão aos sete dias deve ser maior ou igual a 37 MPa. A condição de cura, incluindo o controle de temperatura e do meio, podem ter contribuído para o desenvolvimento da resistência à compressão inferior ao indicado pelo fabricante.

A distribuição do tamanho de partícula do cimento é mostrada na Figura 19.

Figura 19 - Distribuição do tamanho de partícula do CP V-ARI.



Fonte: O autor, 2017.

De acordo com a distribuição de tamanho de partícula apresentada na Figura 19, o cimento CP V-ARI possui diâmetro médio igual a 14,72 μm e diâmetro máximo de 53 μm , atendendo a caracterização física relativa à finura que consta na norma NBR 5733 (1991).

Partículas de cimento com tamanho maior que 45 μm têm dificuldade de hidratação e, partículas maiores do que 75 μm podem nunca hidratar-se (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Helene e Terzian (1992), a finura do cimento é o fator que governa a velocidade de reação da hidratação. O cimento do tipo CP V-ARI é caracterizado pelo desenvolvimento de grande parte de sua resistência à compressão nas primeiras idades.

5.1.2 Cinza volante de madeira

Com base na NBR 12653 (2014), que estabelece requisitos físicos e químicos mínimos para caracterizar um material com potencial pozolânico, as cinzas volantes de madeira cv-A, cv-B e cv-C foram submetidas a sucessivas análises.

No primeiro ensaio determinou-se o teor e óxidos constituintes do material, por meio da espectrometria de fluorescência de raios X.

A Tabela 17 mostra a composição química das três cinzas volantes pesquisadas. A variabilidade na composição química pode estar atrelada ao processo de combustão, incluindo temperatura e, percentual de madeira de Pinus e/ou Eucalipto que compõem a biomassa.

Conforme mencionado na fundamentação teórica, a atividade pozolânica depende da área de superfície específica da pozolana, dos teores de sílica e alumina reativas e da estrutura cristalina desordenada (BATTAGIN, 2011). A reação da pozolana se dá na superfície das partículas, sendo a sílica a que dissolve em maior proporção. Como produto da reação das pozolanas com o cálcio, são formados C-S-H com propriedades cimentícias (CINCOTTO, 2011).

A norma estabelece que o teor de óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) deve ser $\geq 70\%$ para um material pozolânico de classes N e C, ou $\geq 50\%$ para um material de classe E. Pozolanas naturais ou artificiais pertencem à classe N; cinzas volantes de carvão pertencem à classe C e; quaisquer tipos de pozolana que não se enquadram nas classes anteriores podem ser agrupadas na classe E.

Para teor de óxidos, a cv-A atingiu apenas 11,55%, a cv-B atingiu 62,90% e a cv-C chegou a 40,74%.

Com relação à presença de SO_3 (óxido de enxofre), que deve ser sempre $\leq 4\%$ para uma pozolana classe N ou $\leq 5\%$ para as classes C e E, todas as cinzas atenderem ao parâmetro.

Tabela 17 – Composição química das cinzas volantes cv-A (originária da indústria da confecção), cv-B (proveniente da indústria cerâmica) e cv-C (com origem na indústria alimentícia).

Óxidos constituintes	Composição química das cinzas (% em massa)		
	cv-A	cv-B	cv-C
SiO ₂	6,69	46,63	31,10
Al ₂ O ₃	3,67	13,46	6,94
Fe ₂ O ₃	1,19	2,81	2,70
K ₂ O	1,66	6,47	2,50
Na ₂ O	3,27	1,33	2,92
CaO	45,62	16,44	28,78
MgO	7,57	4,35	5,48
MnO	2,06	0,68	1,2
P ₂ O ₅	3,22	2,05	2,71
TiO ₂	0,75	0,67	0,42
B ₂ O ₃	-	-	-
Li ₂ O	-	-	-
BaO	0,27	0,14	0,19
Co ₂ O ₃	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cr ₂ O ₃	< 0,1	< 0,1	< 0,1
PbO	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SrO	0,11	0,09	0,12
ZnO	0,48	< 0,1	< 0,1
SO ₃	Não consta	3,58	Não consta
ZrO ₂ + HfO ₂	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Perda ao fogo	23,40	1,18	14,82

Fonte: O autor, 2017.

Altos valores de SO₃ podem elevar o tempo de pega e provocar a expansão nas primeiras horas de hidratação do cimento Portland pela formação da etringita (WINCKLER, 2015).

Com relação à perda ao fogo, a cinza cv-B foi a única que atendeu ao parâmetro ($\leq 6\%$). Valores maiores de perda ao fogo podem

aumentar a demanda de água para uma dada consistência (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Nesta primeira análise, a cv-B foi a que teve o melhor desempenho com relação aos parâmetros analisados.

Para John, Cincotto e Silva (2003), as cinzas que apresentarem a predominância de sílica no estado amorfo em sua composição química e granulometria adequada, podem ser usadas como adição mineral. Se, adicionalmente, apresentarem reatividade em meio aquoso com o hidróxido de cálcio, podem ser usadas como pozolanas.

De acordo com Sherata e Thomas (2000), os fatores influentes de uma cinza volante são teores de álcalis, cálcio e sílica. Os compostos de CaO e SiO₂ afetam os produtos de hidratação devido à quantidade de cálcio e sílica disponíveis. Quanto maior a quantidade de sílica, maior a quantidade de álcalis retirados da solução, já um teor elevado de cálcio reduz a quantidade de álcalis removidos. Quanto maior o teor de álcalis da cinza, maior o seu desprendimento para a solução dos poros, resultando em maior alcalinidade.

Para avaliar a reatividade da cinza na presença do hidróxido de cálcio, foram confeccionados cps de argamassa para o ensaio de IAP à cal. Para a confecção dos cps, foi determinada a massa específica das três cinzas volantes analisadas. Os valores são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Massa específica das cinzas volantes de madeira.

Cinza volante	Massa específica (g/cm ³)
cv-A	2,81
cv-B	2,63
cv-C	2,70

Fonte: O autor, 2017.

Naik, Kraus e Siddique (2003) avaliaram cinco diferentes fontes de cinzas de madeira e concluíram que a massa específica variou entre 2,26 e 2,60 g/cm³. Os valores encontrados para as cinzas volantes desta pesquisa estão acima dos valores do referido estudo.

Os resultados de resistência à compressão obtidos no ensaio de IAP à cal foram: $1,49 \pm 0,13$ MPa para cv-A; $6,21 \pm 0,18$ MPa para cv-B; $5,93 \pm 0,21$ MPa para cv-C e $5,85 \pm 0,15$ MPa para a mistura entre cv-B e cv-C. A NBR 12653 (2014) menciona que a resistência à compressão dos cps aos 7 dias deve ser ≥ 6 MPa.

De acordo com os dados obtidos no ensaio, verifica-se que apenas a amostra com cv-B apresentou resultado acima do limite mínimo da norma. No entanto, a cinza volante cv-C e a mistura das duas cinzas (cv-B e cv-C) apresentaram resultados próximos ao limite inferior estabelecido.

O índice de consistência de todas as argamassas foi de 225 ± 5 mm.

Além do ensaio de IAP à cal, a norma menciona o ensaio de ID com cimento Portland aos 28 dias, onde a argamassa deve apresentar resistência mínima de 90%, quando comparada com uma argamassa de referência confeccionada com CP II-F-32.

Todas as três cinzas foram submetidas ao ensaio, além de uma composição a qual foram usadas as 2 cinzas que apresentaram maior teor de óxidos (cv-B e cv-C). O resultado encontra-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Ensaio de ID com cimento Portland aos 28 dias.

Argamassa	Resistência à compressão média (MPa)	Índice de desempenho
Referência	35,59	-
Com cv-A	26,87	75,50
Com cv-B	27,98	78,60
Com cv-C	27,04	76,00
Mistura cv-A e cv-B	26,08	73,30

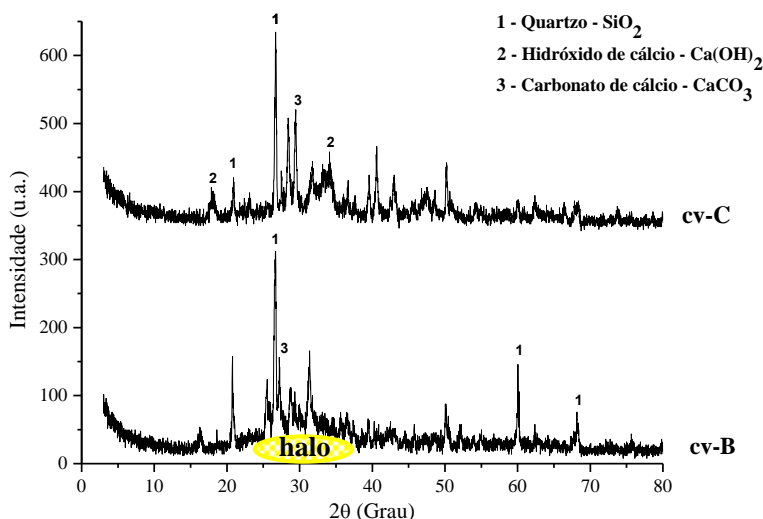
Fonte: O autor, 2017.

De acordo com os resultados, verifica-se que nenhuma das três cinzas analisadas ou a mistura de duas delas atendeu ao parâmetro da norma. As três cinzas analisadas isoladamente resultaram em índice de desempenho inferior ao mínimo exigido.

Diante do fraco desempenho no ensaio de índice de atividade pozolânica a cal, somado ao ID com cimento Portland insuficiente e o baixo teor de óxidos do material, a cv-A não foi avaliada nos ensaios subsequentes.

Na sequência, as cinzas volantes B e C foram avaliadas por meio do ensaio de DRX (Figura 20).

Figura 20 - Difratogramas das cinzas volantes B e C.



Fonte: O autor, 2017.

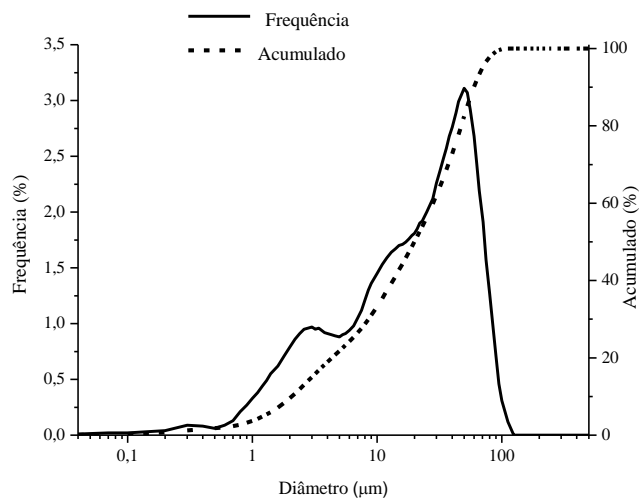
Conforme Vaske (2012), os materiais vítreos se caracterizam por apresentarem em seus difratogramas a linha de base com forma abaulada, com a ausência ou redução de picos. O contrário ocorre com os materiais cristalinos, que apresentam maior definição e volume de picos em seus espectros.

A análise dos difratogramas permite identificar um halo amorfo mais pronunciado na amostra de cinza volante B, caracterizando-a como amorfa com alguma cristalinidade.

De acordo com Winckler (2015), as formas cristalinas tendem a diminuir a ocorrência de atividade pozolânica, sendo que os materiais cristalinos apresentam pouca ou nenhuma reatividade por apresentarem em sua forma fundamental, um estado de menor energia. As fases cristalinas podem ser originadas pela temperatura e tempo de queima e pelo resfriamento lento da cinza.

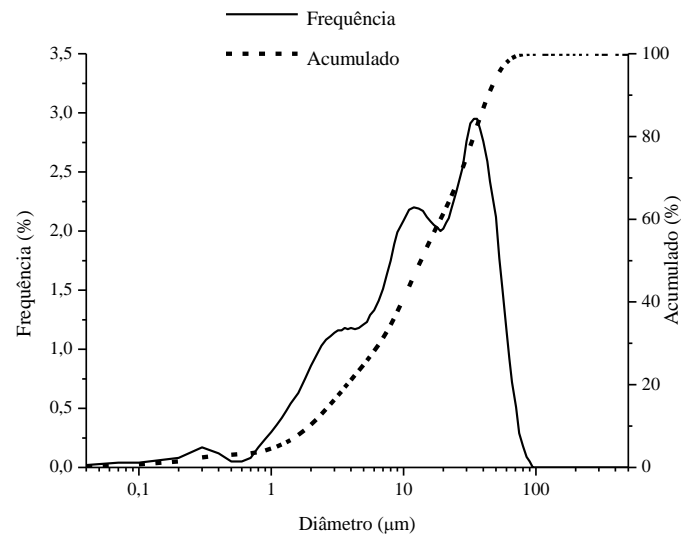
Com relação à distribuição do tamanho de partículas, as Figuras 21 e 22 mostram o resultado das amostras cv-B e cv-C.

Figura 21 - Distribuição do tamanho de partícula da cv-B.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 22 - Distribuição do tamanho de partícula da cv-C.



Fonte: O autor, 2017.

De acordo com a distribuição do tamanho de partícula mostrada nas Figuras 21 e 22, a cv-B apresentou 22% de partículas com diâmetro acima de 45 μm , enquanto a cv-C apresentou apenas 9% de partículas com diâmetro superior ao citado. As cinzas foram submetidas a análise granulométrica após o peneiramento manual, citado no item 4.2.1.1 na etapa de caracterização dos materiais. Para atender ao requisito físico mencionado na NBR 12653 (2014), a cv-B foi cominuída até apresentar no máximo 20% de material com diâmetro superior à 45 μm .

As cinzas volantes B e C apresentaram diâmetro médio final de 26,28 μm e 18,96 μm , respectivamente (Tabela 20). Ambas possuem diâmetros médios maiores do que o cimento.

Tabela 20 - Distribuição do diâmetro de partículas.

Quantidade de partículas (%)	Diâmetro (μm)		
	CP V-ARI	cv-B	cv-C
10	2,06	2,07	1,94
50	12,61	19,93	13,49
90	30,52	59,81	43,72
Médio	14,72	26,28	18,96

Fonte: O autor, 2017.

Winckler (2015) menciona que o diâmetro médio próximo a 30 μm mostra-se adequado para um material ser usado como adição mineral.

A Tabela 21 apresenta um resumo dos resultados apresentados pelas cinzas volantes A, B e C.

Com os resultados até aqui obtidos, pode-se concluir que a cinza volante cv-B apresenta maior potencial para ser usada como material cimentício suplementar. As cinzas volantes cv-A e cv-C não atenderam a nenhum parâmetro analisado nos ensaios para caracterização de material com potencial pozolânico.

O parâmetro de perda ao fogo, com valores de 23,4% e 14,82% para cv-A e cv-C respectivamente, representam a quantidade de material não totalmente calcinado, influenciando na quantidade de água de amassamento e na reatividade do material (WINCKLER, 2015).

Embora com desempenho superior, quando comparado às outras duas cinzas, a cv-B apresentou quantidade de álcalis superior ao preconizado em norma.

Tabela 21 - Características das cinzas volantes.

Requisitos da norma NBR 12653 (2014)				Resultados		
Propriedades físicas	Classes de material pozzolânico			cv-A	cv-B	cv-C
	N	C	E			
Índice de atividade pozzolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mínima	90	90	90	75,5*	78,6*	76,0*
Índice de atividade pozzolânica com cal aos 7 dias, em MPa	6,0	6,0	6,0	1,49*	6,21	5,85*
Propriedades químicas						
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 50	11,5*	62,9	40,74*
SO_3	≤ 4	≤ 5	≤ 5	-	3,58	-
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	23,4*	1,18	14,82*

* Não atende aos parâmetros da norma.

Fonte: O autor, 2017.

Os álcalis podem participar de reações químicas que ocorrem internamente no concreto envolvendo agregados reativos, chamada de reação álcali-agregado (RAA). Como resultado da reação, são formados produtos capazes de expandir e causar tensões internas e fissuração em concretos. Os álcalis envolvidos no processo químico da RAA são derivados do sódio e potássio (HASPARYK, 2011).

A quantidade de álcalis disponíveis é expressa por meio do equivalente alcalino. Para quantificação desse parâmetro foi usada a Equação 2.

$$\text{Eq}_a (\%) = \text{Na} + 0,658 \text{ K} \quad (2)$$

Onde:

Eq_a = equivalente alcalino em porcentagem;

Na = teor de sódio disponível;

K = teor de potássio disponível.

De acordo com o resultado de FRX para a cv-B, o teor de óxido de sódio total foi de 1,33% e, o teor de potássio total foi de 6,47%. Para aplicar a equação 2, é necessário verificar o teor de óxidos de sódio e potássio disponíveis, sendo que o resultado deve ser igual ou inferior ao limite recomendado por norma que é de 1,5%.

Nem todos os álcalis presentes no material estão disponíveis para reação, eles são divididos em álcalis solúveis e álcalis insolúveis. Para participar da reação, os álcalis devem ter a capacidade de se solubilizar (HASPARYK, 2011). Os álcalis que participam da RAA são aqueles que não ficam fixos na estrutura cristalina dos C-S-H ou nos próprios agregados (BATTAGIN, 2011).

Usou-se o ensaio de determinação do teor de álcalis disponíveis para materiais pozolânicos, como forma de quantificar o percentual real da amostra de cinza.

O resultado obtido foi de 0,59% para sódio e 3,24% para potássio, resultando no equivalente alcalino de 2,72%, valor ainda acima do limite preconizado em norma.

A limitação no teor dos álcalis em uma pozolana não é suficiente para garantir a ausência da RAA em uma argamassa ou concreto. Os álcalis podem vir de outras fontes como cimento e água de amassamento (HASPARYK, 2011).

Dessa forma, a NBR 15577-1 (2008) recomenda limitar o teor de álcalis do concreto, considerando-se uma intensidade de ação preventiva mínima, a valores menores que 3,0 kg/m³ de concreto, expresso de acordo com o equivalente alcalino.

Ainda que a quantificação dos álcalis, expressa em equivalente alcalino, tenha resultado em valores acima do preconizado em norma, optou-se pelo uso da cv-B, como SCM, para compor um cimento/aglomerante na produção de argamassa e concreto.

Outra caracterização realizada determinou a área da superfície específica para a cv-B e, o valor encontrado foi de 1,41 m²/g. Esse valor é inferior a área da superfície específica do cimento, que corresponde à 1,57 m²/g e inferior a da Pozolanita igual à 8,45 m²/g.

Segundo Winckler (2015), quanto maior a superfície específica, maior é a tendência ao empacotamento e o potencial de reatividade do material. Isso ocorre em consequência do aumento do número de pontos de nucleação da reação com os compostos hidratados de cimento Portland, principalmente o Ca(OH)₂. Esse aumento da reatividade tende a ter relação direta com os resultados da atividade pozolânica com a cal.

Com relação a cloretos, como forma de proteger as armaduras de concreto, a NBR 12655 (2015) limita o teor de íons cloreto em estruturas de concreto armado. Segundo a norma, para estruturas expostas a condições normais de serviço, é admitido um valor máximo sobre a massa de cimento de 0,30%.

O ensaio realizado para determinação de sais solúveis, cloretos e sulfatos identificou que em cada 1000 g da amostra de cv-B está contido 5 g de cloretos solúveis em água. Este valor será mencionado no momento da composição do concreto com pozolana.

Para finalizar a caracterização da cv-B, foram realizados ensaios do extrato lixiviado e solubilizado. A caracterização ambiental é mostrada parcialmente na Tabela 22.

Com relação ao ensaio de lixiviação, o resíduo foi caracterizado como não tóxico e classificado como não perigoso – Classe II.

No ensaio do extrato solubilizado, cromo e sulfato apresentaram concentrações superiores aos limites de norma. Com relação à presença de cromo, a ocorrência desse metal está associada às grelhas, feitas com ligas de cromo, onde ocorre a queima das cinzas. Conforme Raupp-Pereira (2006), o processamento ao qual foi submetido o resíduo influencia as suas características. No ensaio de reatividade, o resíduo foi classificado com não-reativo.

O resultado da análise da massa bruta caracterizou o resíduo como corrosivo com $\text{pH} = 12,5$, ultrapassando o limite estabelecido pela norma que é de 12,4.

Considerando todas as análises de caracterização ambiental, a cinza volante B foi classificada como resíduo perigoso – Classe I.

Tabela 22 - Extrato lixiviado e solubilizado cv-B.

Parâmetros	Resultados (mg/L)	Valor máximo permitido NBR 10004 (2004) (mg/L)
LIXIVIADO		
Arsênio	0,41	1,0
Bário	0,65	70,0
Chumbo	< 0,01	1,0
Cromo total	1,51	5,0
Fluoreto	0,34	150,0
Mercúrio	< 0,001	0,1
Prata	< 0,01	5,0
Selênio	< 0,01	1,0
SOLUBILIZADO		
Alumínio	0,2	0,2
Arsênio	< 0,01	0,01
Bário	0,1	0,7
Cádmio	< 0,005	0,005
Chumbo	< 0,01	0,01
Cloreto	< 25	250,0
Cobre	< 0,005	2,0
Cromo total	7,41*	0,05
Ferro	< 0,02	0,3
Fluoreto	< 0,5	1,5
Manganês	< 0,01	0,1
Mercúrio	< 0,001	0,001
Prata	< 0,01	0,05
Selênio	< 0,01	0,01
Sódio	167,83	200
Sulfato (expresso em SO ₄)	2164*	250,0
Zinco	< 0,01	5,0

* Não atende aos parâmetros da norma.

Fonte: O autor, 2017.

De acordo com os resultados obtidos durante a caracterização das cinzas volantes, a composição do cimento/aglomerante para a próxima etapa será feita com CP V-ARI, cv-B como SCM, acrescido de Pozolanita, a fim de completar o teor de adição máximo de um cimento pozolânico tipo CP IV.

5.1.3 Cinza de grelha de madeira

As cinzas de grelha foram usadas como substituto parcial da areia em concreto. Sua composição química é mostrada da Tabela 23, juntamente com outros resultados de cinzas grossas de madeira, obtidas por outros autores.

Tabela 23 – Composição química de cinzas de grelha ou cinzas grossas.

Óxidos constituintes	Composição química das cinzas (% em massa)				
	cg- ABC	Garcia; Coutinho, 2013	Naik, 2004	Vassilev et al., 2010	Abdullahi, 2006
CaO	26,78	8,10	11,4	16,0	10,53
SiO ₂	25,37	69,50	42,3	26,50	31,80
Al ₂ O ₃	6,57	4,18	17,9	9,0	28,0
K ₂ O	5,77	3,60	1,30	5,0	10,38
Fe ₂ O ₃	3,55	1,99	12,6	5,40	2,34
MgO	2,40	1,24	2,50	3,0	9,32
Na ₂ O	2,03	1,40	-	-	6,50
MnO	1,26	0,24	-	-	-
P ₂ O ₅	1,80	-	-	-	-
TiO ₂	1,26	-	-	0,51	-
SrO	0,19	-	-	-	-
ZnO	0,08	-	-	-	-
SO ₃	0,98	< 0,1	0,4	4,80	-
Perda ao fogo	11,06	3,59	9,9	23,4	27,0

Fonte: O autor, 2017.

Verifica-se que a cg-ABC apresenta teor de óxidos igual a 35,49%, o que não permite classificá-la como pozolana. De fato, neste

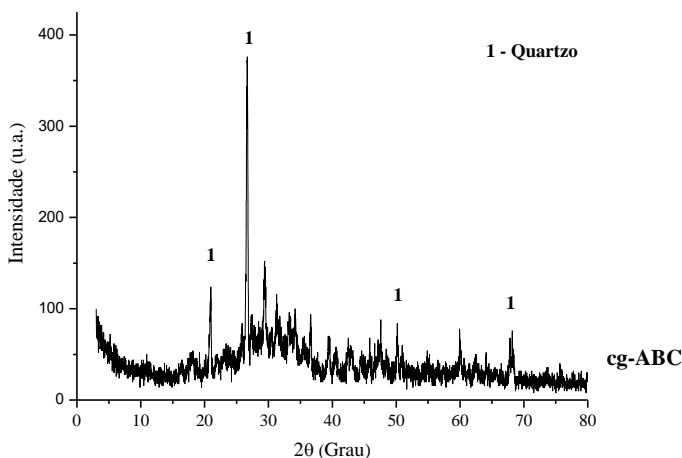
trabalho, propõe-se o uso da cinza de grelha como material de enchimento ou carga, na substituição da areia em argamassas e concretos.

Os valores diferem de outras pesquisas realizadas com cinza grossa (GARCIA; COUTINHO, 2003; NAIK, 2004; VASSILEV et al., 2010; ABDULLAHI, 2006), mostrando a diversidade das cinzas obtidas de diferentes fontes a partir da combustão da madeira.

O parâmetro de perda ao fogo encontrado foi de 11,06%. Semelhante ao que acontece com a cinza volante, valores maiores de perda ao fogo conduz ao aumento de demanda de água para uma dada consistência.

Uma amostra da cinza da grelha foi submetida à análise de DRX, conforme é mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Difratoograma da cinza de grelha cg-ABC.

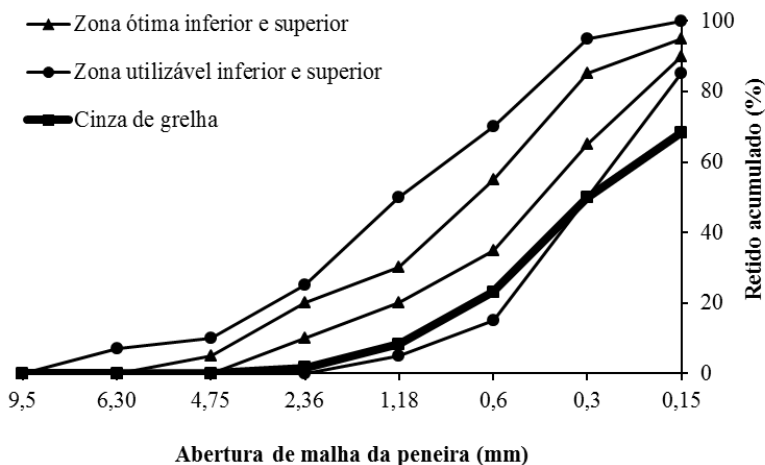


Fonte: O autor, 2017.

O difratograma mostra um material com alguma cristalinidade com fases de quartzo, porém com aspecto amorfo.

A granulometria, obtida conforme ensaio de agregado miúdo para concreto, é mostrada na Figura 24.

Figura 24 - Granulometria da cinza de grelha.



Fonte: O autor, 2017.

Nota-se no gráfico que a quantidade de finos presentes é maior que o preconizado em norma, que define as zonas utilizável e ótima de granulometria para os agregados. De acordo com LESSARD et al. (2017), uma distribuição de tamanho de partícula menor do que a areia ajuda a densificar a estrutura granular.

É importante ressaltar que a norma NBR 7211 (2009) – Agregados para concreto: especificação, foi usada neste ensaio como forma de se obter uma comparação com a granulometria da areia, tendo em vista que a mesma norma não é aplicável a resíduos.

De acordo com Helene e Terzian (1992), a composição granulométrica apresenta influência sobre a qualidade dos concretos, agindo na compactidade e resistência.

A dimensão máxima característica da cinza de grelha ficou em 2,36 mm e o módulo de finura igual a 1,5.

A massa específica (densidade) e a massa unitária ou aparente da cinza de grelha foram de 2390,0 kg/m³ e 820,0 kg/m³ respectivamente. O índice de absorção obtido foi de 13,3%.

A absorção de água de um agregado reciclado de concreto ou argamassa pode chegar a 15%. No caso de agregados de cerâmica vermelha esse valor pode alcançar 24% (ÂNGULO; FIGUEIREDO,

2011). De acordo com a NBR 15116 (2004), a absorção de água de um agregado miúdo misto deve ser $\leq 17\%$ para uso em concreto sem função estrutural.

A Tabela 24 mostra o resultado dos ensaios de lixiviação e solubilização para caracterização ambiental da cg-ABC.

Tabela 24 - Extrato lixiviado e solubilizado da cg-ABC

Parâmetros	Resultados (mg/L)	Valor máximo permitido NBR 10004 (2004) (mg/L)
LIXIVIADO		
Arsênio	< 0,025	1,0
Bário	0,6	70,0
Chumbo	0,15	1,0
Cromo total	0,29	5,0
Fluoreto	0,37	150,0
SOLUBILIZADO		
Alumínio	0,1	0,2
Arsênio	< 0,025	0,01
Bário	0,27	0,7
Cádmio	< 0,005	0,005
Chumbo	< 0,01	0,01
Cloreto	1357,6*	250,0
Cobre	< 0,01	2,0
Cromo total	0,99*	0,05
Ferro	< 0,02	0,3
Fluoreto	< 0,5	1,5
Manganês	< 0,01	0,1
Mercúrio	< 0,001	0,001
Nitrato (expresso em N)	2,05	10,0
Sódio	167,83	200
Sulfato (expresso em SO ₄)	888,8*	250,0
Zinco	0,03	5,0

* Não atende aos parâmetros da norma.

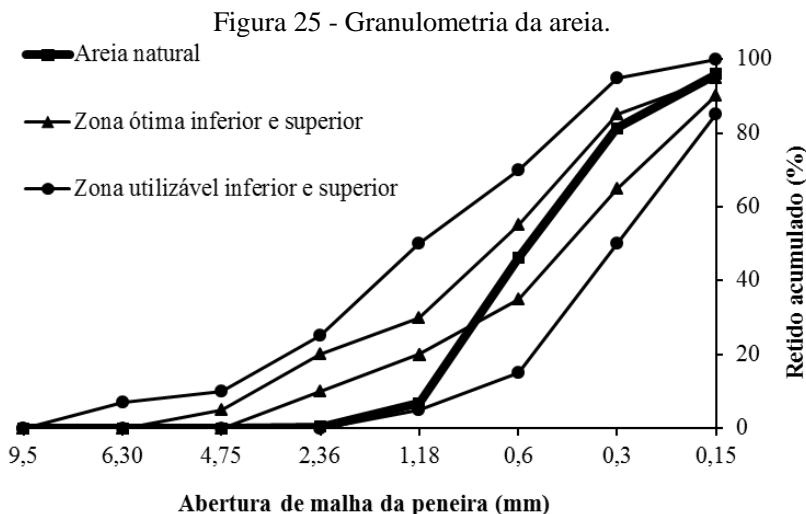
Fonte: O autor, 2017.

A cinza de grelha apresentou solubilidade em água com resultados acima dos limites preconizados em norma para: cloreto, cromo e sulfato. Não foram realizadas análises para identificar a origem dos parâmetros que ficaram fora da norma.

Referente aos resultados apresentados, o resíduo foi caracterizado como não tóxico, não inerte e não perigoso, obtendo classificação, conforme a NBR 10004 (2004), classe II-A.

5.1.4 Areia

A análise granulométrica da areia, obtida conforme ensaio de agregado miúdo para concreto, é mostrada na Figura 25.



Fonte: O autor, 2017.

Verifica-se no gráfico que a areia utilizada nesta pesquisa, apresenta granulometria adequada à normatização de agregados para concreto. A dimensão máxima característica da areia ficou em 2,36 mm e o módulo de finura igual a 2,3. A massa específica e a massa unitária da areia foram de 2553,0 kg/m³ e 1626,0 kg/m³, respectivamente. O índice de absorção obtido de 0,76% é semelhante à absorção de outras areias comerciais (LESSARD et al., 2017).

5.1.5 Brita

A Tabela 25 mostra os valores da caracterização do agregado graúdo utilizado na pesquisa.

Tabela 25 - Caracterização do agregado graúdo.

Propriedades e características	
Massa específica (kg/m ³)	2928,34
Absorção de água (%)	0,96
Massa unitária (kg/m ³)	1516,00
Módulo de Finura (-)	7,0
Diâmetro máximo característico (mm)	19,0

Fonte: O Autor, 2017.

Com relação à absorção de água, em geral, agregados graúdos de boa qualidade apresentam valores abaixo de 1,0% (SBRIGHI, 2011). A porosidade do agregado interfere na resistência à compressão do produto cimentício (ALHADAS, 2008) e, principalmente, no módulo de deformação do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O agregado graúdo escolhido para esta pesquisa foi brita nº 01 (diâmetro entre 9,5 mm e 19 mm). De acordo com Metha e Monteiro (2008), a utilização de brita nº 01 em formulações cimentícias com relação água/ cimento inferior a 0,55, conduz a resistências à compressão superiores a 30 MPa.

5.2 ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE DE MADEIRA EM ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND

Após a caracterização dos materiais, nesta segunda etapa, foram produzidas cinco argamassas, sendo: uma de referência comercial com 100% de cimento Portland (CP IV-32), uma de referência interna e três com substituição de 50% do cimento Portland por pozolana e cv-B, conforme mostrado na Tabela 10. A relação água cimento foi mantida em 0,48 (parâmetro de norma) para todas as misturas.

A trabalhabilidade obtida na argamassa de referência comercial foi de 185 ± 5 mm. A trabalhabilidade da argamassa de referência interna ficou em 150 ± 5 mm. Conforme aumentava a adição de cinza volante, a trabalhabilidade das argamassas modificava, sendo 155 ± 5

mm, 165 ± 5 mm e 180 ± 5 mm para as argamassas com 17%, 33% e 50% de cv-B, respectivamente. Não foi usado qualquer tipo de aditivo superplastificante. A Tabela 26 mostra os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão nas argamassas com 28 e 91 dias de cura.

Tabela 26 - Ensaio de resistência à compressão – 28 e 91 dias.

Argamassa	Resistência à compressão (MPa)	
	28 dias	91 dias
Referência comercial	$37,34 \pm 0,90$	$41,50 \pm 2,30$
Referência interna	$37,37 \pm 1,20$	$42,14 \pm 1,40$
Com 17% cv-B	$36,77 \pm 1,70$	$41,07 \pm 1,60$
Com 33% cv-B	$34,56 \pm 1,90$	$38,36 \pm 2,60$
Com 50% cv-B	$29,68 \pm 0,40$	$35,42 \pm 0,10$

Fonte: O Autor, 2017.

Verifica-se, por meio da tabela, que na medida em que a cinza volante de madeira é adicionada à mistura, a resistência à compressão diminui. Porém, a resistência de todas as misturas continua a aumentar com o tempo de cura.

Elinwa e Mahmmud (2002) estudaram a resistência à compressão de diferentes misturas de concreto com cinza volante de madeira em diferentes tempos de cura. Os autores observaram que a resistência à compressão diminui com o aumento do teor de cinza de madeira, porém aumenta com o tempo de cura.

Rajamma et al. (2009), utilizando cinzas de madeira em substituição ao cimento em teores de 10, 20 e 30% em massa, observaram que a resistência à compressão aos 28 dias decresceu para os teores de 20 e 30%.

A substituição de um cimento altamente reativo por um pó menos reativo, no caso a cinza volante, pode explicar parte da perda de resistência mecânica, principalmente quando são usadas altas taxas de substituição (LESSARD et al., 2017).

O esgotamento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado pela hidratação do cimento cessa as reações pozolânicas e, consequentemente, a produção de C-S-H adicional ao sistema (NEVILLE, 2016). Com isso, o desenvolvimento da resistência à compressão pode ficar comprometido.

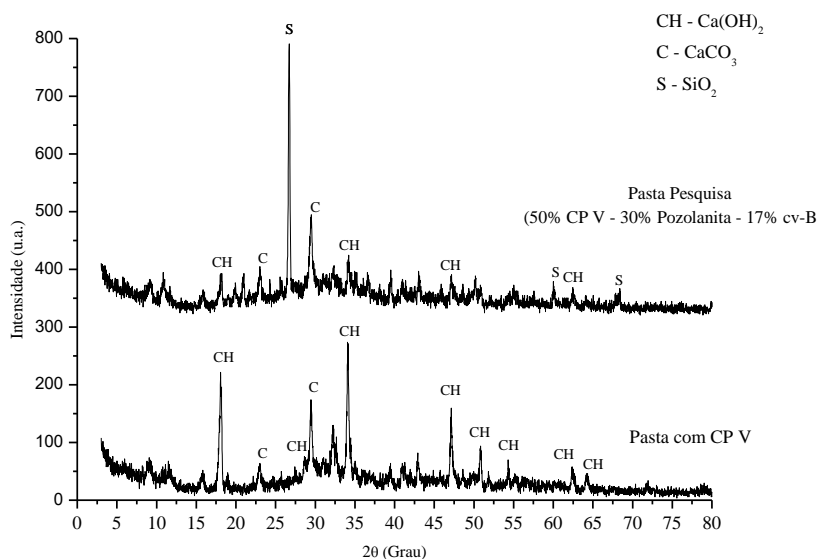
Um único exemplar de cada argamassa produzida foi rompido na idade de 120 dias (4 meses). Os resultados obtidos foram: 41,30 e 41,09

MPa para as argamassas de referência comercial e interna, respectivamente, demonstrando que não houve incremento na resistência à compressão. Para as argamassas com adição de cinza volante e Pozolanita os resultados foram 41,62, 41,37 e 36,06 MPa para adições de 17, 33 e 50% de cv-B respectivamente. Nestes últimos resultados, há indícios que de havia a disponibilidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no sistema e a reação com cinza volante continuava a formar C-S-H adicional.

A difração de raios X pode ser usada em conjunto com outros ensaios para avaliar a ocorrência de reações pozolânicas (CORDEIRO, 2006). A simples comparação de altura dos picos não permite comparação quantitativa das fases (COSTA et al., 2013), porém, é possível identificar a ocorrência de novos picos.

Análises de DRX feitas em pasta com cimento CP V e na pasta com aglomerante (50% CP V – 33% Pozolanita - 17% cv-B) mostram que a intensidade dos picos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ diminuiu na pasta com adição mineral (Figura 26), possivelmente devido a reação pozolânica. O ensaio foi realizado em pastas com 10 dias após a hidratação.

Figura 26 - DRX de pasta de cimento CP V e pasta de aglomerante Pesquisa, após 10 dias de cura.

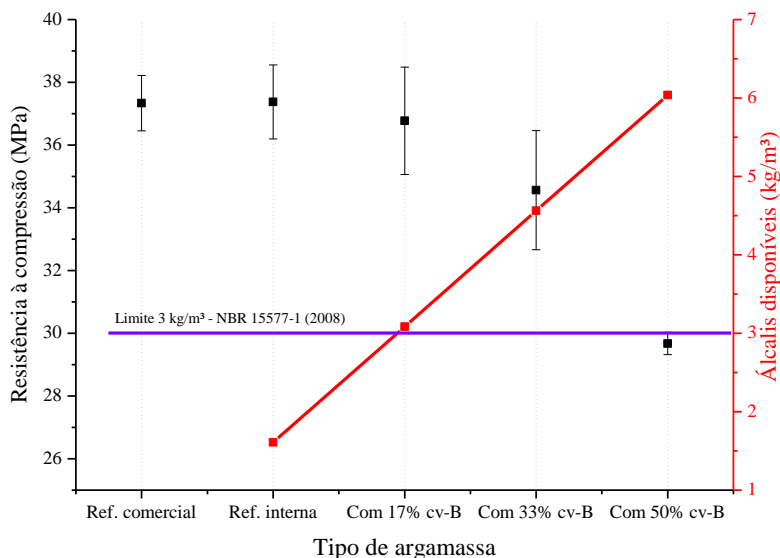


Fonte: O Autor, 2017.

De acordo com Soares (2015), a intensidade de picos de Ca(OH)_2 nas difrações de raios X diminuíram com o aumento da porcentagem de adição mineral em tendência não linear.

A Figura 27 mostra a resistência à compressão média de cada mistura aos 28 dias e a quantidade estimada de álcalis para um concreto com consumo de cimento igual a 350 kg/m^3 .

Figura 27 - Resistência à compressão média *versus* quantidade de álcalis.



Fonte: O Autor, 2017.

Pode-se verificar na Figura 27, que a resistência à compressão não apresenta diferença significativa entre as argamassas de referência comercial, referência interna, argamassa com 17% de cv-B e com 33% de cv-B. No entanto, a resistência à compressão mostra tendência negativa quando aumenta-se o percentual de cinza de madeira na mistura.

Considerando o consumo estimado de cimento, pode constatar que a quantidade de álcalis aumenta conforme se adiciona cinza volante de madeira na mistura.

Para atender ao limite de álcalis disponíveis mencionado em norma ($3,0 \text{ kg/m}^3$) e manter a resistência à compressão equivalente a

argamassa de referência comercial, optou-se pela composição com 17% de cv-B.

De acordo com os dados obtidos nesta etapa experimental, o cimento/aglomerante da etapa seguinte será composto por 50% de cimento Portland CP V-ARI, 33% de Pozolanita e 17% de cv-B.

5.3 ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE E CINZA DE GRELHA DE MADEIRA EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

O objetivo desta etapa foi produzir um concreto estrutural simples, com razoável resistência à compressão (entre 20 e 50 MPa).

A seguir são descritos os resultados obtidos na determinação do teor de argamassa, ensaios de resistência à compressão e diagrama de dosagem, em concretos com cinza de grelha na substituição parcial do agregado miúdo.

5.3.1 Teor de argamassa e trabalhabilidade

O teor ideal de argamassa encontrado para a composição do aglomerante estudado foi de 49%.

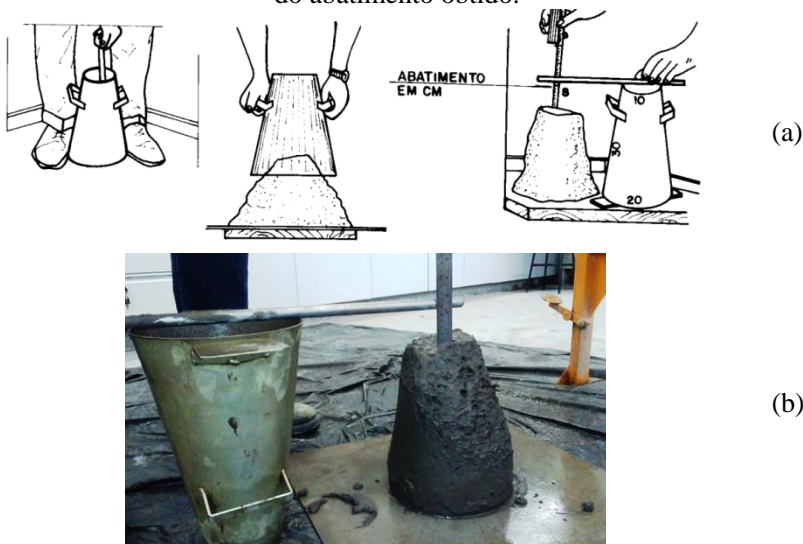
Ao teor de argamassa encontrado, adiciona-se de 2 a 4% de perdas relativas ao transporte e lançamento da mesma. Nesta pesquisa, optou-se por utilizar 2% de perda, ficando o teor final de argamassa igual a 51%. Para este teor, o traço unitário do concreto, em massa, é de 1:2,06:2,94 (cimento:areia:brita).

O resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone (Figura 28) foi de 70 ± 10 mm.

A trabalhabilidade é uma propriedade do concreto fresco indicando o quão trabalhável ele pode ser. É o resultado da capacidade de o concreto ser adensado, transportado até sua conformação final e sua resistência à segregação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo a NBR 6118 (2014), a consistência do concreto, que influencia sua trabalhabilidade, deve estar de acordo com as dimensões da peça a ser concretada, espaçamento das armaduras, processo de lançamento e adensamento utilizados. Conforme Ripper (1995), os limites de abatimento para concreto com consistência firme e plástica fica entre 3,0 mm e 7,0 mm.

Figura 28 – Fotografia mostrando (a) os passos para a moldagem do corpo de prova de concreto fresco e (b) o aspecto do concreto e medida do abatimento obtido.



Fontes: (a) Araújo; Rodrigues; Freitas, 2000.
(b) O Autor, 2017.

A relação a/c encontrada durante a determinação do teor ideal de argamassa foi de 0,50.

5.3.2 Adição de cinza de grelha ao concreto

Os resultados dos ensaios de abatimento, resistência à compressão e módulo de elasticidade dos cps de concreto são mostrados na Tabela 27.

Observa-se que a resistência à compressão aumentou nos cps contendo 20 e 30% de cinza de grelha. Entretanto, o abatimento é reduzido de forma considerável. A introdução de agregados mais finos do que o concreto de referência, conduz a área superficial específica maior no sistema e, consequentemente, aumenta a demanda de água para manter o mesmo abatimento.

Tabela 27 - Resultados dos ensaios de abatimento, resistência à compressão e módulo de elasticidade em concreto.

Concreto	Ensaio em concreto fresco	Ensaio em concreto endurecido - 28 dias	
	Abatimento (cm)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Ref. comercial	15,0	$38,42 \pm 1,42$	$46,26 \pm 2,18$
Ref. interna	10,0	$38,98 \pm 0,97$	$41,55 \pm 1,63$
Pesquisa	10,0	$40,20 \pm 0,70$	$44,43 \pm 0,80$
Pesquisa com 10% cg-ABC	7,0	$38,82 \pm 0,53$	$42,42 \pm 0,97$
Pesquisa com 20% cg-ABC	5,0	$40,44 \pm 0,80$	$41,73 \pm 0,33$
Pesquisa com 30% cg-ABC	4,0	$40,96 \pm 1,13$	$39,70 \pm 1,60$

Fonte: O Autor, 2017.

Udoeyo et al. (2006) reportaram que a trabalhabilidade do concreto diminui consideravelmente com o aumento do teor de adição das cinzas à mistura.

Alaejos et al. (2004) observaram que a utilização de agregados na condição saturada com superfície seca reduz a variação da consistência dos concretos no estado fresco, tornando mais fácil o controle da trabalhabilidade.

De acordo com Neville (1997), o concreto deve apresentar trabalhabilidade tal que possibilite o seu adensamento até um máximo de compacidade, usando razoável quantidade de energia. O abatimento não mede a facilidade de adensamento do concreto, não refletindo seu comportamento em condições dinâmicas.

É possível observar, na Tabela 27, que à medida que se acrescenta cinza de grelha ao concreto, a resistência à compressão tende a aumentar, porém o módulo de elasticidade mostra tendência inversa.

Mehta e Monteiro (2008) descrevem que a utilização de agregados mais porosos no concreto contribui para a redução do módulo de elasticidade.

De acordo com Liu et al. (2017a), para concretos com diferentes teores de substituição de agregados naturais por reciclados, na medida em que aumenta esse teor, o módulo de elasticidade diminui.

Carrijo (2005) comenta que embora as propriedades dos agregados possam ser estudadas de forma independente, o desempenho no concreto deve ser usado como critério para definir a qualidade de um agregado reciclado ou resíduo.

Como forma de complementar os resultados de resistência à compressão, foram moldados cps de argamassa com a mesma composição do concreto, exceto a presença do agregado graúdo. A Figura 29 permite observar a diferença nos resultados de resistência à compressão obtida em concretos e argamassas. Nota-se que quando a cinza de grelha foi adicionada ao concreto, não houve ganho de resistência em relação aos concretos de referência. Por outro lado, o ganho de resistência em argamassas é de até 18% em relação à argamassa sem a presença da cinza de grelha.

No caso de agregados porosos, alguns pesquisadores acreditam que a água retida nos poros pode contribuir para a hidratação do cimento, como se fosse uma cura úmida interna (MACHADO; LATTERZA; MENDES, 1998; BREMNER, 1998; DE LARRARD, 1999).

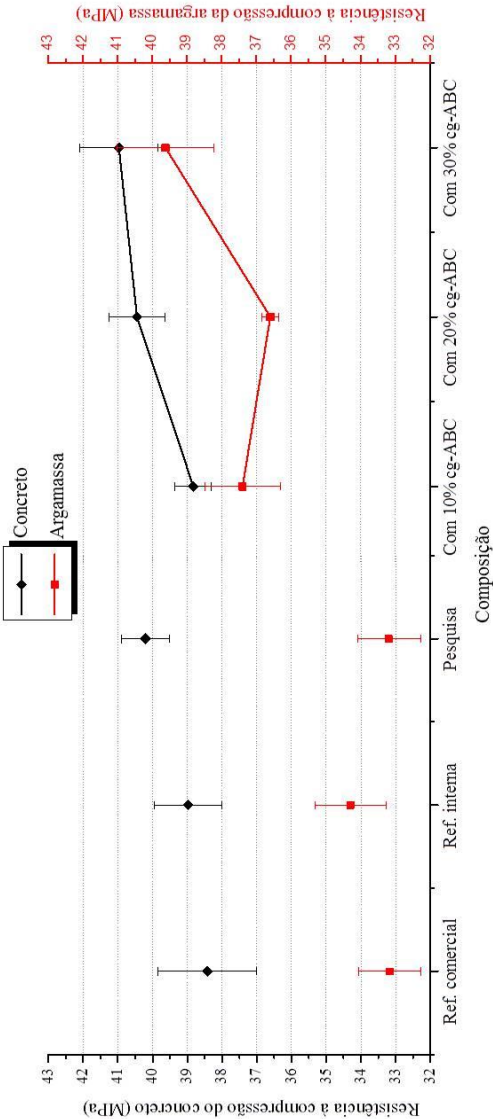
Liu et al. (2017b) incorporaram cenosferas (partículas ocas de cinzas) saturadas em argamassa de cimento para cura interna. Observaram a redução da retração autógena e melhoria da resistência à compressão.

Concreto com cura interna (CCI) é o processo no qual uma quantidade de água adicional (não é água de hidratação) é fornecida por materiais que são incorporados ao concreto. Dentre os materiais incorporadores de água estão agregados leves, geralmente miúdos. Devido a melhor hidratação da pasta de cimento, a cura interna pode reduzir a retração autógena e melhorar propriedades mecânicas e de durabilidade (REPETTE, 2011).

Leite (2001) menciona que a alta absorção dos agregados pode ocasionar uma redução da relação água/cimento efetiva das misturas, elevando valores de resistência e módulo em concretos com agregados reciclados.

O efeito físico de empacotamento proporcionado pelas cinzas, também interfere na resistência à compressão (JOHN; CINCOTTO; SILVA, 2003).

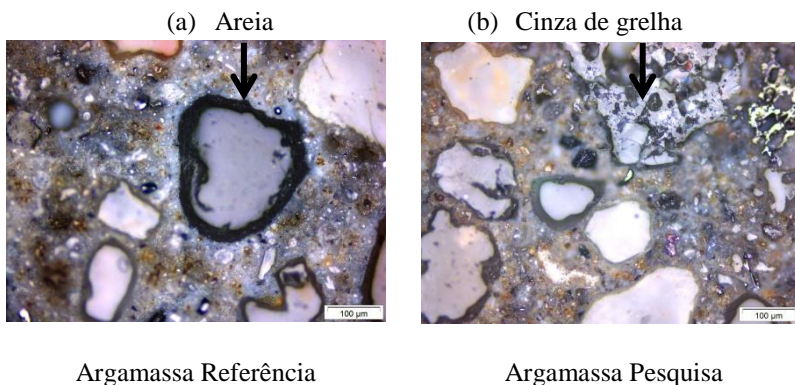
Figura 29 - Resistência à compressão de concretos e argamassas com cinzas de madeira.



Fonte: O Autor, 2017.

Em imagens com microscópio óptico, conforme Figura 30, é possível observar que a cinza de grelha apresenta superfície irregular, permitindo que a pasta de cimento penetre nas cavidades deste tipo de agregado.

Figura 30 – Micrografias mostrando (a) partícula de areia em argamassa de referência e (b) partícula de cinza em argamassa com resíduo.



Fonte: O Autor, 2017.

Com base nos resultados obtidos e revisão da bibliografia, possivelmente a disponibilidade de material amorfo e a absorção de água da cinza de grelha, contribuíram para o aumento da resistência à compressão, evidenciado principalmente nas argamassas com cinzas de madeira.

No caso da absorção, a cinza pode ter deixado uma quantidade menor de água disponível para a hidratação do cimento, contribuindo para o acréscimo de resistência por meio da menor relação a/c.

Tpçu e Ugurlu (2003) usaram enchimento mineral em teores de até 15% em substituição à areia na produção de concretos. Os autores observaram melhora na resistência à compressão em teores de até 10% de substituição.

Os resultados observados nesta etapa, quanto à resistência à compressão, classificam o concreto Pesquisa com 30% de cg-ABC para os ensaios de durabilidade.

O consumo de cinza volante de madeira para fazer 1 m³ do concreto Pesquisa é de 64,86 kg. Com isso, estima-se que a concentração de cloretos derivados da cinza cv-B seja de 324,3 g. Esse

valor corresponde a 0,083% da massa de cimento, abaixo do limite mencionado em norma, que é de 0,3%.

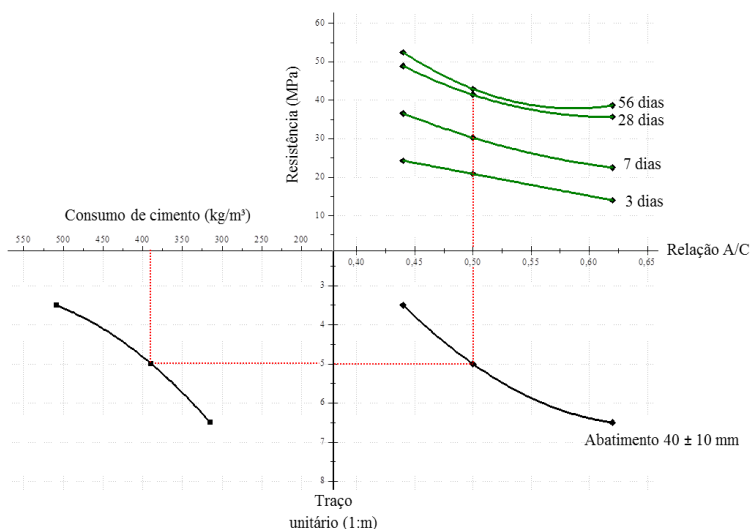
Com relação à quantidade de álcalis, de acordo com os resultados obtidos, estima-se que estejam disponíveis 3,40 kg de álcalis para cada metro cúbico de concreto produzido, proveniente apenas do aglomerante.

Não foi quantificado o total de álcalis e cloretos disponíveis no agregado cinza de grelha, porém a possibilidade de ocorrer a reação álcali-agregado será avaliada em um dos ensaios de durabilidade.

Para finalizar a caracterização do concreto produzido com resíduo de madeira, foram realizados os procedimentos para obtenção do diagrama de dosagem (Figura 31).

Com a relação a/c e materiais definidos, a resistência e durabilidade do concreto passam a ser únicas (HELENE e TERZIAN, 1992). As características e propriedades dos concretos e argamassas dependem da qualidade e proporções dos materiais com que são compostos (ABCP, 2002).

Figura 31 - Diagrama de dosagem: concreto com cinza de madeira

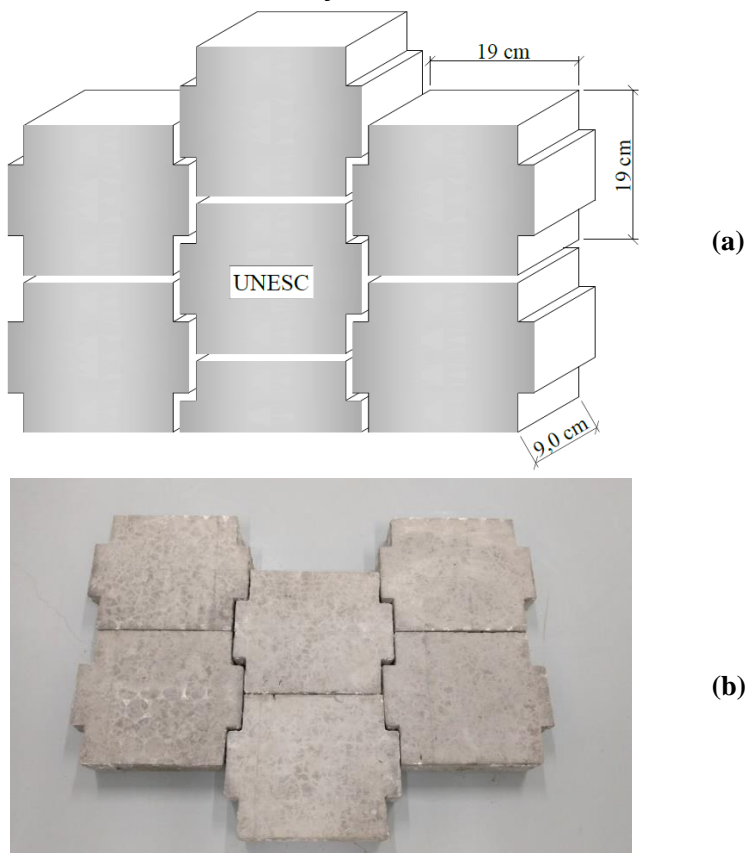


Fonte: O Autor, 2017.

O concreto produzido com cinzas de madeira foi usado na confecção de algumas peças de pavimentação, conforme é mostrado na Figura 32, como forma de demonstrar seu aspecto, cor e desempenho mecânico.

A resistência à compressão obtida nestas peças foi de $41,87 \pm 2,14$ MPa. De acordo com a NBR 9781 (2013), a resistência à compressão aos 28 dias deve ser $\geq 35,0$ MPa para peças destinadas ao tráfego de pedestres e veículos leves.

Figura 32 – Fotografia mostrando (a) dimensões das peças de pavimentação projetadas e, (b) peças de pavimentação produzidas com concreto com adição de cinzas de madeira.



5.4 ANÁLISES DE DURABILIDADE

Algumas propriedades do concreto interferem na expectativa de vida do material e são norteadas pelos mecanismos de absorção capilar, permeabilidade e difusão. Normalmente, o concreto mais resistente à entrada de agentes agressivos (água, oxigênio e CO_2) será o mais durável (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997).

Os ensaios de durabilidade, realizados nesta etapa da pesquisa, visam verificar o desempenho do concreto produzido com cinzas de madeira, quando confrontado com o concreto produzido com cimento de referência comercial.

5.4.1 Absorção de água

A absorção de água por imersão, processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso (SILVA, 2011), foi mensurada por meio do ganho de massa em relação ao estado seco.

A Tabela 28 mostra os resultados do ensaio de absorção de água em cps de concreto referência e concreto com cinza de madeira.

Tabela 28 - Absorção de água em concreto.

Propriedades	Concreto Referência	Concreto Pesquisa
Massa aparente seca (kg/m^3)	2.381,85	2.353,26
Massa aparente saturada (kg/m^3)	2.459,67	2.442,94
Massa específica seca (kg/m^3)	1.553,35	1.520,52
Massa específica saturada (kg/m^3)	1.602,45	1.579,44
Absorção (%)	3,16	3,87
Índice de vazios	7,71	9,25

Fonte: O Autor, 2017.

Os resultados mostram que o concreto com adição de cinza de madeira apresentou índice de vazios e absorção de água maiores em relação ao concreto Referência, na ordem de 20 e 22,5%, respectivamente. A massa específica do concreto Referência apresenta valores superiores ao concreto Pesquisa.

Com relação à absorção de água e índice de vazios, Carrijo (2005) notou uma tendência crescente de seus valores em função do aumento da relação a/c e da redução da massa específica dos agregados.

De acordo com os dados obtidos na caracterização dos agregados, verifica-se que a cinza de grelha apresenta massa específica menor do que a areia, compactuando com os resultados de Carrijo (2005).

Helene (1983) propôs uma classificação com base em critérios de durabilidade, na qual absorção de água $< 4,2\%$ classifica um concreto como durável, em uma escala que inclui concreto durável, normal e deficiente.

A NBR 9781 (2013) determina que a absorção de peças de concreto para pavimentação, semelhante às peças produzidas nesta pesquisa, deve ser menor ou igual a 6%.

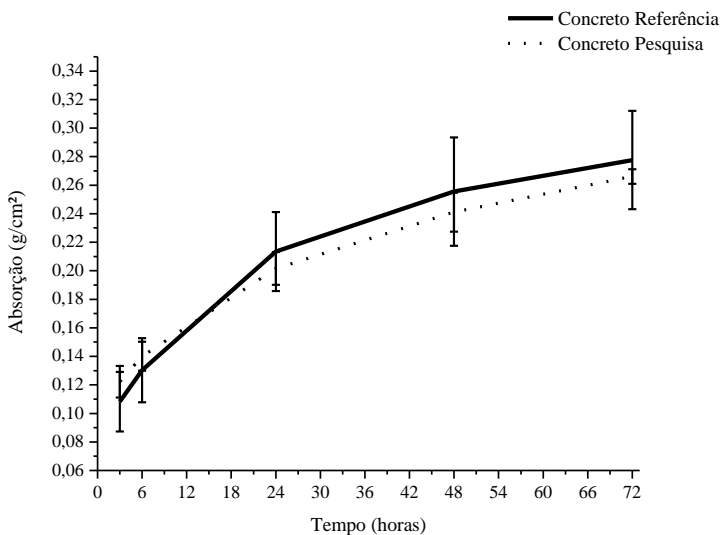
5.4.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade não teve como objetivo verificar diretamente a qualidade do concreto produzido, mas sim observar se existem diferenças quando comparado a um concreto de referência.

Os cps submetidos ao ensaio foram produzidos e deixados em cura por 28 dias. Após esse período, foram realizados os procedimentos para secagem até massa constante, resfriamento em dessecador e contato com lamina de água com 5 ± 1 mm de altura por 72 h.

A Figura 33 mostra a evolução da absorção de água por capilaridade do concreto Referência e do concreto Pesquisa durante o ensaio

Figura 33 - Evolução da absorção por capilaridade.



Fonte: O Autor, 2017.

Os valores não revelaram diferenças significativas entre a absorção de água nos dois concretos. Ambos apresentam estatisticamente os mesmos valores até o limite de 72 h (tempo preconizado em norma).

Após as 72 horas do ensaio de absorção por capilaridade, os cps foram submetidos ao ensaio de compressão diametral para identificar a ascensão de água. A Figura 34 mostra a ascensão de água nos cps rompidos após o ensaio.

Figura 34 – Fotografias mostrando a ascensão de água em corpos de prova de concreto (10 cm x 20 cm), após o ensaio de absorção de água por capilaridade.

Concreto Referência



cp – 01 Ref.



cp – 02 Ref.



cp – 03 Ref.

Concreto Pesquisa



cp – 01 Pesq.



cp – 02 Pesq.



cp -03 Pesq.

Fonte: O Autor, 2017.

A média de altura alcançada pela água imediatamente após o ensaio de compressão foi de 14 mm para os cps de referência e 27 mm para o concreto com cinza de madeira.

O maior índice de vazios apresentado pelo concreto Pesquisa possivelmente contribuiu para maior ascensão capilar.

5.4.3 Ataque por sulfato

Os sulfatos podem penetrar desde o exterior por difusão iônica ou por sucção capilar (PRISZKULNIK, 2011). Todos os sulfatos são danosos ao concreto, reagindo com a pasta de cimento hidratado. No ataque, os íons sulfato reagem com o Ca(OH)_2 e o C_3A originando a etringita tardia e o gesso. Esta formação expande-se, exercendo pressão e desintegrando o concreto (AGUIAR, 2006).

A etringita tardia, formada em materiais cimentícios endurecidos, pode ser formar ou recrystalizar sob condições propicias de temperatura, umidade e alcalinidade, onde são disponibilizados sulfatos, aluminatos e água em concentrações adequadas para promover as reações (MELO, 2010).

Do ponto de vista experimental, foram investigadas barras de argamassa submetidas à cura térmica em solução de sulfato de sódio.

A NBR 13583 (2014) não estabelece limites para a expansão nas barras de argamassa, porém, usualmente e de acordo com a ABCP, adota-se como critério preliminar a expansão máxima de 0,030% aos 42 dias de cura em solução de sulfato de sódio.

A Tabela 29 mostra os resultados da variação dimensional obtidos nos dois tipos de argamassas, Referência e Pesquisa, sendo que os cps de referência foram moldados com CP IV. Nesta tabela é possível verificar que as duas composições ficaram abaixo do limite de 0,030% de expansão aos 42 dias.

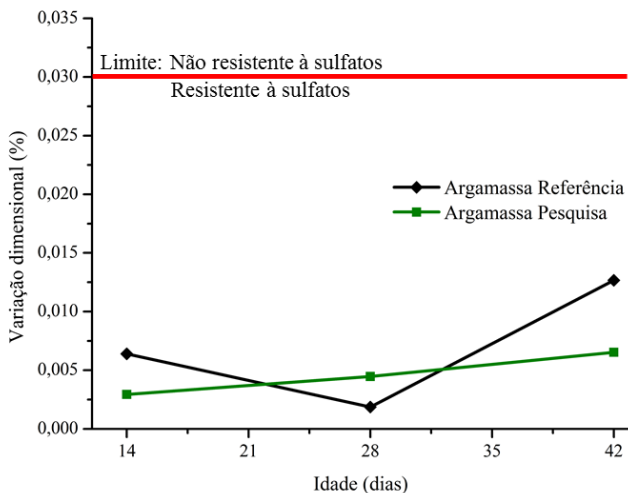
A Figura 35 ilustra graficamente a evolução da expansão média conforme a idade de cura das barras. Verifica-se que na idade de 28 dias, as barras de argamassa Referência sofreram retração. A argamassa de Referência foi moldada com cimento com adição de pozolana - CP IV, portanto, a resistência a sulfatos dessa argamassa já era esperada.

Tabela 29 - Variação dimensional em barras de argamassa.

Período de ensaio (dias)		Referência	Pesquisa
14 dias	$E_{\text{solução}}$	0,0087	0,0076
	$E_{\text{água}}$	0,0023	0,0047
	Es - Ea	0,0064	0,0029
28 dias	$E_{\text{solução}}$	0,0093	0,0051
	$E_{\text{água}}$	0,0075	0,0007
	Es - Ea	0,0019	0,0045
42 dias	$E_{\text{solução}}$	0,0184	0,0078
	$E_{\text{água}}$	0,0057	0,0013
	Es - Ea	0,0127	0,0065

Fonte: O Autor, 2017.

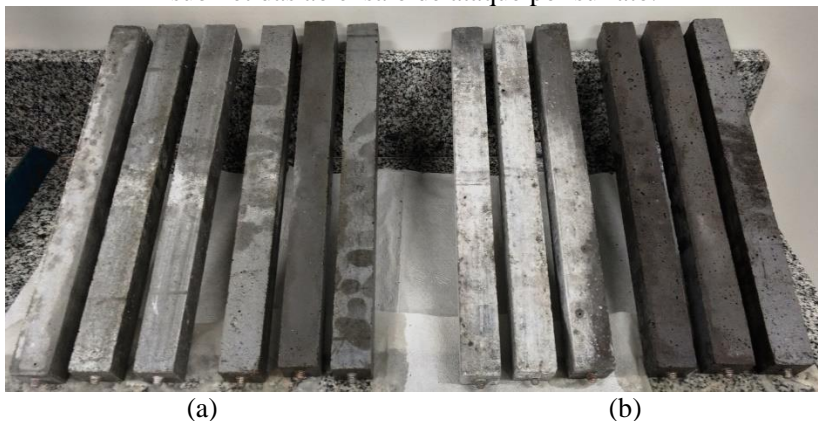
Figura 35 - Resultado do ensaio de ataque por sulfato.



Fonte: O Autor, 2017.

Os cps não apresentaram fissuras ou qualquer defeito que pudesse ser visto a nível macroscópico, como pode ser observado por meio da Figura 36.

Figura 36 – Fotografia mostrando (a) as seis barras de argamassa do tipo Referência e, (b) as seis barras de argamassa tipo Pesquisa, após serem submetidas ao ensaio de ataque por sulfato.



Fonte: O Autor, 2017.

De acordo com Dal Molin (2011), normalmente adições minerais com atividade química, como é o caso da cinza volante de madeira e também da Pozolanita, promovem aumento da resistência aos sulfatos dos concretos em comparação àqueles sem adições.

As adições minerais, ao reagirem com o hidróxido de cálcio resultante da reação de hidratação do cimento, reduzem a sua quantidade disponível para se combinar com os sulfatos presentes e gerar etringita tardia, responsável pela reação expansiva da argamassa (DAL MOLIN, 2011).

Conforme Emmons (1993), a redução do fator a/c , cimentos com baixo teor de C_3A e a introdução de cinzas volantes nas misturas aumentam a resistência do concreto contra o ataque de sulfatos.

5.4.4 Reação álcali-agregado (RAA)

Diante dos resultados obtidos com relação aos álcalis disponíveis, consumo de cimento por metro cúbico e uso de agregado de fonte diversa da convencional, fez-se uma avaliação da RAA.

O ensaio foi conduzido com duas composições de argamassa, conforme consta no planejamento experimental: argamassa com cimento padrão e agregados de cinza de grelha e, argamassa com cimento e

adições minerais (pozolana + cv-B) e agregados de cinza de grelha. A segunda composição buscou avaliar o comportamento da combinação de ambas as cinzas em relação à reação expansiva.

A NBR 15557 (2008) considera que nas barras que apresentam expansões médias inferiores a 0,19% aos 28 dias, contados a partir da cura em solução de hidróxido de sódio, o agregado é classificado como inócuo. Quando as expansões forem maiores ou iguais a 0,19%, os agregados são considerados reativos.

De acordo com a ASTM C1260 (2014), as barras que apresentam expansões médias inferiores a 0,10% aos 14 dias são constituídas de agregados inócuos. Se as expansões forem superiores a 0,10% e inferiores a 0,20% nesta idade, os agregados são classificados como potencialmente deletérios. Para expansões maiores a 0,20% aos 14 dias, tem-se um comportamento deletério dos agregados.

A Tabela 30 mostra os resultados das expansões médias para as argamassas avaliadas. O agregado cinza de grelha apresentou comportamento reativo com variação dimensional igual a 0,269%. No entanto, o uso da cinza volante e pozolana mitigaram a reação deletéria, apresentando variação dimensional da barra inferior ao preconizado na norma brasileira e americana.

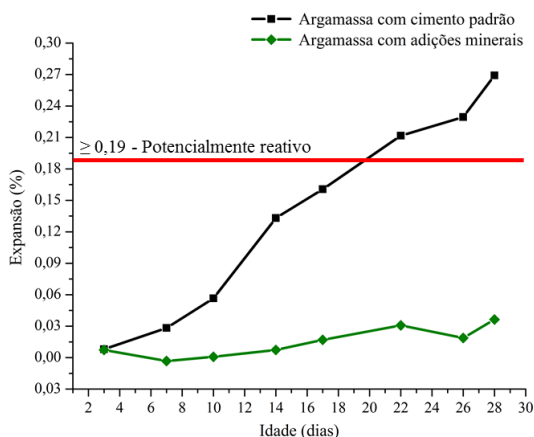
Tabela 30 - Variação dimensional das barras de argamassa.

Idade (dias)	Variação dimensional média (%)	
	Cimento padrão com agregado pesquisa	Cimento pesquisa com agregado pesquisa
3 dias	0,008	0,007
7 dias	0,028	-0,003
10 dias	0,057	0,001
14 dias	0,133	0,007
17 dias	0,161	0,017
22 dias	0,212	0,031
26 dias	0,229	0,019
28 dias	0,269	0,036

Fonte: O Autor, 2017.

A Figura 37 ilustra a evolução das expansões médias das duas argamassas submetidas ao ensaio.

Figura 37 - Evolução da expansão média no ensaio de RAA.



Fonte: O Autor, 2017.

Os agregados usados nesta pesquisa apresentaram comportamento potencialmente reativo pela norma brasileira e potencialmente deletérios pela norma americana.

Com relação à avaliação das adições minerais, como agente mitigador da reação álcali-agregado, as expansões menores do que 0,19% mostram que foram eficazes na prevenção do fenômeno.

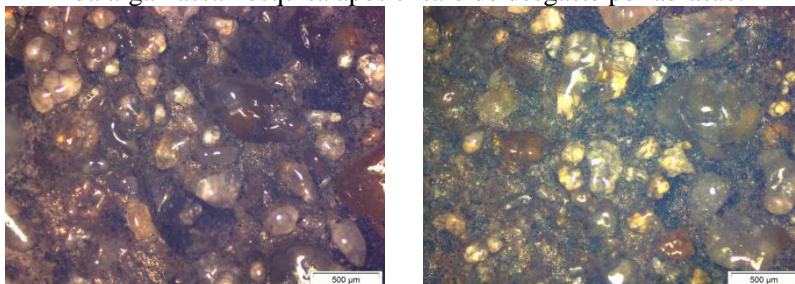
Conforme Hasparyk (2011), o emprego de adições minerais está entre as medidas preventivas para mitigação da RAA.

5.4.5 Desgaste por abrasão

Os resultados do ensaio de desgaste por abrasão mostraram perda de massa equivalente para as duas argamassas analisadas, sendo $0,46 \pm 0,06\%$ e $0,47 \pm 0,08\%$ para as argamassas Referência e Pesquisa, respectivamente.

Na Figura 38 são mostradas duas imagens feitas com microscópio óptico das superfícies desgastadas. Aparentemente não se pode verificar nenhuma diferença entre as duas superfícies, compactuando com os resultados obtidos de perda de massa. A fricção durante o ensaio parece retirar com maior facilidade a argamassa deixando os grãos de agregados expostos.

Figura 38 – Micrografias mostrando (a) imagem da superfície do corpo de prova de argamassa Referência e, (b) da superfície do corpo de prova da argamassa Pesquisa após ensaio de desgaste por abrasão.



(a)

(b)

Fonte: O Autor, 2017.

Liu (1981 apud MEHTA e MONTEIRO, 2008) encontrou uma correlação entre a relação a/c e a resistência à abrasão do concreto, onde, conforme aumenta o primeiro, ocorre uma diminuição na resistência do segundo.

Ensaio de porosidade foram feitos para as duas argamassas a fim de verificar uma possível influência no desgaste por abrasão. A argamassa de Referência apresentou porosidade de 13,18%, enquanto que a argamassa Pesquisa apresentou 12,40% de porosidade.

Conforme o ACI Committee 201.2R (American Concrete Institute), a obtenção de superfícies de concreto resistentes à abrasão é conseguida com concretos de resistência superior a 28 MPa.

A resistência à compressão das duas argamassas analisadas neste ensaio foi de 32,28 MPa e 37,59 MPa, respectivamente.

5.4.6 Caracterização ambiental

Além da caracterização ambiental do resíduo *in natura*, é recomendável a realização da caracterização ambiental dos materiais ou produtos nos quais os resíduos foram incorporados, de maneira a verificar se os mesmos estão devidamente inertizados ou encapsulados (CALMON, 2007).

De acordo com o resultado do ensaio de lixiviação, as argamassas Referência e Pesquisa foram classificadas como material não perigoso – Classe II.

É importante destacar que o resíduo cinza volante de madeira, foi caracterizado como perigoso – Classe I. Porém, após a incorporação deste em argamassa, a mesma apresentou classificação de material não perigoso – Classe II.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram caracterizadas e avaliadas duas cinzas de madeira em composições cimentícias: cinza volante como material ligante suplementar ao cimento Portland e cinza de grelha como agregado alternativo à areia natural.

Em relação à caracterização das cinzas volantes:

- As cinzas volantes estudadas são constituídas majoritariamente de sílica e cal.

- Dentre as cinzas volantes caracterizadas, nenhuma atendeu aos parâmetros físicos e químicos para ser caracterizada como pozolana.

- A cv-B foi a cinza volante de madeira que mais se aproximou de uma pozolana, dentre as três cinzas analisadas, atendendo aos requisitos da norma quanto ao teor de óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), presença de SO_3 , perda ao fogo e IAP à cal. Porém, não atendeu aos parâmetros de álcalis disponíveis e ID com cimento. Conforme os resultados obtidos, a cv-B foi usada como SCM em conjunto com uma pozolana comercial nas misturas cimentícias produzidas.

Com relação à caracterização da cinza de grelha:

- A cinza de grelha foi caracterizada quanto ao teor de óxidos, obtendo-se o valor de 35,49%, o que não permite classificá-la como uma pozolana.

- O agregado cinza de grelha apresentou tamanhos de partículas inferiores ao agregado comercial e, índice de absorção de água superior. Esses índices interferiram na trabalhabilidade dos materiais cimentícios obtidos.

Com relação à adição de cinza volante de madeira em argamassa de cimento Portland:

- A resistência à compressão diminuiu na medida em que foram adicionadas maiores quantidades de cinza volante de madeira, passando de ~37 MPa, obtido para uma argamassa de referência, para ~29,5 MPa para uma argamassa com substituição de 50% de cimento Portland por CVB.

- A resistência à compressão aumentou, em média, 5 MPa aos 91 dias para todas as misturas de argamassa, revelando indícios característicos da forma lenta com que ocorrem as reações pozolânicas.

- A quantidade de álcalis disponíveis na CVB, não permitiu a aplicação de teores superiores a 17% na composição com cimento pozolânico.

Com relação à adição de cinza volante e cinza de grelha em concreto de cimento Portland:

- Os resultados mostraram uma tendência ao aumento da resistência à compressão em argamassas, conforme eram substituídas maiores quantidades de areia por cinza de grelha. Em contrapartida, o módulo de elasticidade decresceu com a adição do agregado alternativo. A interpretação dos resultados sugere o aumento da resistência em decorrência da absorção de água da cinza de grelha, deixando a relação água/cimento menor e/ou o processo de cura interna proporcionado pelos agregados porosos.

- Com relação aos concretos e argamassas com cinza de grelha, existe a necessidade de adicionar mais água na mistura para atingir a mesma trabalhabilidade de materiais de referência. Possivelmente, devido à maior área de superfície específica e absorção de água da cinza.

Com relação às análises de durabilidade dos materiais cimentícios produzidos com CB:

- Absorção de água e índice de vazios foram superiores ao concreto de referência.

- A argamassa produzida com as duas cinzas de madeira, apresentou comportamento resistente ao ataque por sulfatos.

- As cinzas de grelha apresentaram comportamento reativo no ensaio da reação álcali-agregado. Porém, esse comportamento deletério foi mitigado pela cinza volante e pozolana utilizadas na composição do ligante cimentício.

- A cinza volante de madeira foi classificada como resíduo Perigoso - Classe I e, a cinza de grelha como Classe II-A. No entanto, os materiais cimentícios onde as cinzas foram incorporadas, foram enquadrados na Classe II, segundo a NBR 10004 (2004).

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização da presente pesquisa, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Investigar a influência do processamento da cinza de madeira para obtenção de pozolanas;
- Investigar álcalis disponíveis para a cinza de grelha;
- O resultado deste trabalho originou um concreto com 13,07 % (em massa) de resíduo incorporado. Estudar maiores adições de resíduos em concretos envolvendo a condição saturada com superfície seca para o emprego das cinzas.

REFERÊNCIAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. ed. São Paulo, 2002. 28 p.

ABDULLAHI, M. **Characteristics of wood ash/OPC concrete**. Leonardo Electron J Pract Technol. v. 8, p. 9-16, 2006.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (United States of America). **Guide to durable concrete**: ACI 201.2R, 2008.

AGUIAR, José Eduardo de. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis**. 2006. 173 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Editora Pini, 2000.

ALAEJOS, P.; SÁNCHEZ, M.; DAPENA, E.; VÁZQUEZ, E.; BARRA, M.; ETXEBERRIA, M.; MARÍ, A.; AGULLO, L.; MARÍNEZ, F.; FONTEBOA, B.; POLANCO, A.; FRANCISCO, G.; ALEZA, F.; PARRA, J.; BURON, M.; **Draft of Spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete**. International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures. Espanha, 2004. p. 511-525.

ALHADAS, Miguel F.S. **Análise da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto**. 2008. 126 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (EUA). **Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/ rubber wheel apparatus**: G65-16. ASTM, 2016.

_____. **Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)**: C1260-14. Philadelphia: ASTM, 2014.

ÂNGULO, Sérgio C.; FIGUEIREDO, Antônio D. Concreto com agregados reciclados. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1731-1768.

ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. M. **Requisitos para a execução de aterros de resíduos de construção e demolição**. Câmara ambiental da construção. 2002.

ASHBY, Michael F; JONES, David R.H. **Engenharia de materiais**. v. 2. Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2007. 436 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). **Agregados para concreto - especificação**: NBR 7211. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **Agregados - reatividade álcali-agregado parte 5: determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**: NBR 15577-5. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **Agregados - reatividade álcali-agregado parte 1: guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto**: NBR 15577-1. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **Agregados - reatividade álcali-agregado parte 4: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**: NBR 15577-4. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **Agregados - determinação da composição granulométrica**: NBR NM 248. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **Agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios**: NBR NM 45. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **Agregados para concreto – determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis**: NBR 9917. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____ **Agregado fino - determinação de massa específica e massa específica aparente:** NBR NM 52. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____ **Agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água:** NBR NM 53. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____ **Agregado miúdo - determinação da absorção de água:** NBR NM 30. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____ **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos** NBR 15116. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____ **Areia normal para ensaio de cimento - especificação:** NBR 7214. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____ **Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica:** NBR 9778. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____ **Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade:** NBR 9779. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____ **Cimento Portland - Análise química - Determinação do resíduo insolúvel:** NBR NM 15. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____ **Cimento Portland de alta resistência inicial:** NBR 5733. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____ **Cimento Portland – determinação da resistência à compressão:** NBR 7215. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

_____ **Cimento Portland – determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio:** NBR 13583. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____ **Cimento Portland de pozolânico:** NBR 5736. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.

_____ **Concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento:** NBR 12655. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____ **Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova:** NBR 5738. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____ **Materiais inorgânicos – determinação do desgaste por abrasão:** NBR 12042. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____ **Materiais pozolânicos: especificação:** NBR 12653. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____ **Materiais pozolânicos – determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias:** NBR 5751. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____ **Materiais pozolânicos – determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias:** NBR 5752. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____ **Materiais pozolânicos - determinação do teor de álcalis disponíveis:** NBR NM 25. Rio de Janeiro: ABNT, 2003

_____ **Pedras de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio:** NBR 9781. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____ **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos:** NBR 10005. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____ **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos:** NBR 10006. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____ **Projeto de estruturas de concreto - procedimento:** NBR 6118. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____ **Resíduos sólidos – classificação:** NBR 10004. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. G. A. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: Editora Universidade Rural, 2000.

BAN, C. C.; RAMLI, M. **The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: an overview**. Resources, conservation and recycling. v. 55, p. 669-685. 2011.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 185-232.

BAUER, R. J. F.; PAULON, V. A.; TOKODUME, S.; SANTOS, F. B. **Influência dos endurecedores de superfície sobre a resistência ao desgaste por abrasão**. In. Congresso Brasileiro do concreto – REIBRAC, 44, 2002, Belo Horizonte. Anais. São Paulo: IBRACON: 2002.

BRANCO, Pércio M. **Rochas**. Disponível em <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Rochas-1107.html>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

BRUNDLE, C. Richard; EVANS, Jr. Charles A.; WILSON Shaun **Encyclopedia of materials characterization surfaces, interfaces, thin films**. Boston: Butterworths Heinemann, 1992. 751 p.

BORLINI, M. C.; SALES, H. F.; VIEIRA, C. M. F.; CONTE, R. A.; PINATTI, D. G.; MONTEIRO, S. N. **Cinza de lenha para aplicação em cerâmica vermelha parte I: características da cinza**. Cerâmica, v. 51, p.192-196, 2005.

BREMNER, T. W. **Lightweight aggregate concrete**. In: 40º Congresso brasileiro do concreto. Rio de Janeiro: IBRACON, 1998.

BRUKER – **Fluorescência de raios X (XFR)**. Disponível em: <<http://www.bruker.coml>>. Acesso em: 19 dez. 2016.

CALMON, João Luiz. Resíduos industriais e agrícolas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 1591-1628.

CAMELO, D. L.; SILVA, D. N.; SOUZA, P. S. L.; MARTINS, M. L. **Contribuição ao estudo de aproveitamento da cinza da casca da castanha do Pará como material pozolânico**. Anais do 47º congresso brasileiro do concreto. Recife, 2005.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

CBIC - CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (Brasil). Disponível em: <www.cbicdados.com.br>. Acesso em: 14 fev. 2017.

CHATTERJI, S. **The hole of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the breakdown of Portland cement concrete due to alkali-silica reaction**. Cement and concrete research. v. 9, n. 2. p. 185-188. 1979.

CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK, P. **Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash**. Journal of environmental management. v. 90, n. 3, p. 1435-1441. 2009.

CHEAH, C. B.; SAMSUDIN, M. H.; RAMLI, M.; PART, W. K.; TAN, L. E. **The use of high calcium wood ash in the preparation of ground granulated blast furnace slag and pulverized fly ash geopolymers: a complete microstructural and mechanical characterization**. Journal of cleaner production. v. 153, p. 114-123. 2017.

CHOWDHURY, S.; MISHRA, M.; SUGANYA, O. **The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: an overview**. Ain shams engineering journal, v. 6, p. 429-437, 2015.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. **Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars**. Construction and building materials. v. 23, p. 3523-3531. 2009.

CINCOTTO, Maria Alba. Reações de hidratação e pozolânicas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. P. 381-414.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 445 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios**. Química nova, v. 32, n. 1, p. 82-86. 2009.

COSTA, E. B.; NOBRE, T. R. S.; GUERREIRO, A. Q.; MANCIO, M.; KIRCHHEIM, A. P. **Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental**. Ambiente construído. v. 13, n. 2, p. 75-86. 2013.

COUTINHO, J. S. **Ciência os materiais – 1ª parte**. (2002). Disponível em <
http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/cienciadosmateriais/apontamentos/teorica_20022003/JSC_089a104.pdf>. Acesso em 09 jan. 2017.
 DAL MOLIN, Maristela Coitinho. Adições minerais. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 261-309.

_____. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 345-379.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. 1999. 420 p.

ELINWA, A. U.; MAHMMOD, Y. A. **Ash from timber waste as cement replacement material**. Cement & concrete composites, v. 24. p. 219-222, 2002.

EMMONS, Peter H. **Concrete repair and maintenance**. Kingston: R. S. Means Company, 1993. 295 p.

ETIÉGNI, I.; CAMPBELL, A. G. **Physical and chemical characteristics of wood ash**. Bioresource technology. v. 37, p. 173-178. 1991.

GARCIA, M. L; COUTINHO, J. S. **Strength and durability of cement with forest waste bottom ash**. Construction and Building Materials. v. 41; p. 897-910, 2013.

GLEIZE, Philippe, J. P. Nanociência e nanotecnologia dos materiais cimentícios. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1871-1884.

HASPARYK, Nicole Pagan. Reação álcali-agregado no concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 933-1001.

HELENE, P. R. **La agresividad del medio y la durabilidad del hormigón**. Hormigón, AATH, n. 10. p. 25-35, 1983.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 905-944.

HELENE, Paulo; TERZIAN Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992. 350 p.

HOPPE, Alessandro Eduardo. **Carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz sem moagem**. 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

ISAIA, Geraldo C. A água no concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 311-346.

JOHN, Vanderley M. Concreto sustentável. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1843-1870.

JOHN, V.; ÂNGULO, S. C. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. In: ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Coleção Habitare. v. 4. Porto Alegre, 2003. P. 9-71

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. Cinza e aglomerantes alternativos. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. **Tecnologia e materiais alternativos de construção**. Campinas: UNICAMP, 2003. P. 145-190.

KANNING, Rodrigo César. **Avaliação do potencial pozolânico da cinza de folha de bananeira**. 2010. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

KANNING, R. C.; PORTELLA, K. F.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; SANTOS, J. C. M. **Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement**. Construction and building materials, v. 54, p. 460-465, 2014.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. O cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ensino pesquisa e realizações**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 295-322.

LEITE, M. Batista. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

LESKO, S.; LESNIEWSKA, E.; NONAT, A.; MUTIN, J. C.; GOUDONNET, J. P.. **Investigation by atomic force microscopy of forces at the origin of cement cohesion.** Ultramicroscopy. v. 86, p. 11-21. 2001.

LESSARD, J. M.; OMRAN, A.; HAMOU, A. T.; GAGNE, R. **Feasibility of using biomass fly and bottom ashes in dry-cast concrete production.** Construction and Building Materials. v. 132, p. 565-577. 2017.

LIMA, Sofia Araújo. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: estudo de caso da cinza da casca da castanha de caju.** 2008. 160 f. Dissertação (Mestrado em arquitetura e urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.

LIU, C. H.; FU, J. Y.; PI, Y. L.; TUAN, C. Y.; LIU, A. R. **Influence of demolished concrete blocks on mechanical properties of recycled blend concrete.** Construction and building materials, v. 136, p. 329-347, 2017a.

LIU, F.; WANG, J.; QIAN, X.; HOLLINGSWORTH, J. **Internal curing of high performance concrete using cenospheres.** Cement and concrete research, v. 95, p. 39-46, 2017b.

MACHADO, E. F.; LATTERZA, L. M; MENDES, C. L. **Influência do agregado graúdo, proveniente da reciclagem de rejeitos de construção e demolição (entulho), na perda do abatimento do concreto fresco e nas propriedades mecânicas do concreto endurecido.** In: 40º Congresso brasileiro do concreto. Rio de Janeiro: IBRACON, 1998.

MARTINS, F.M., MARTINS, J.M., FERRACIN, L.C., CUNHA, C.J. Mineral phases of green liquor dregs, slaker grits, lime mud and wood ash of a Kraft pulp and paper mill. **Journal of Hazardous Materials.** v. 147, 610-617, 2007.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 773-808.

MEHTA, P. Kumar. Natural pozzolans. In: **Supplementary cementing materials for concrete**. Edited by V. M. Malhotra. Canadá, 1987.

MEHTA, P. Kumar.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MELO, Sandra K. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. 2010. 150 f. Dissertação – Programa de pós-graduação em geotecnia, mecânica das estruturas e construção civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil.

MCT – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (Brasil). **Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais – produtos minerais**. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0215/215795.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2017.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **Balanco energético nacional: ano base 2014 – BEN**. Disponível em <www.ben.epe.gov.br>. Acesso em: 20 jan. 2016.

_____. **Plano nacional de energia 2030**. Disponível em <www.epe.gov.br>. Acesso em: 11 jan. 2016.

NAIK, T. R. **Betão ecológico com subprodutos industriais e pós-consumo**. Relatório Nº CBU-2004-21, REP-570, 2004.

NAIK, T. R.; KRAUS, R. N.; SIDDIQUE R. **CLSM containing mixtures of coal ash and a new pozzolanic material**. ACI Mater J. 100 (3). p. 208-215. 2003.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

_____. **Propriedades do concreto**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 523 p.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Revista brasileira engenharia agrícola e ambiental. v. 13, n. 3, p. 353-357. 2009.

PAULON, Vladimir. A microestrutura do concreto convencional. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 584-604.

PAULON, Vladimir; KIRCHHEIM, Ana Paula. Nanoestrutura e microestrutura do concreto endurecido. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 585-614.

POUEY, Maria T. Fernandes. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 345 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

PRISZKULNIK, Simão. Ações físicas e químicas de degradação do concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1003-1028.

QUANTACHROME – **Surface área & pore size analyzer** Disponível em: < <http://www.quantachrome.com> >. Acesso em: 10 dez. 2016.

RAJAMMA, R.; BALL, R. J.; TARELHO L. A. C.; ALLEN, G. C.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M. **Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials**. Journal of Hazardous materials. v. 172. p. 1049-1060. 2009.

RAMOS, T.; MATOS, A. M.; COUTINHO, J. S. **Mortar with wood waste ash: mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion**. Construction and building materials . v. 49. p. 343-351. 2013.

RANJBAR, N.; BEHNIA, A.; ALSUBARI, B.; BIRGANI, P. M.; JUMAAT, M. Z. **Durability and mechanical properties of self-compacting concrete incorporating palm oil fuel ash**. Journal of cleaner production. v. 112. p. 723-730. 2016.

RAO, N. V.; RAJASEKHAR, M.; VIJAYALAKSHMI, K.; VAMSHYKRISHNA, M. **The future of civil engineering with the influence and impact of nanotechnology on properties of materials**. Procedia materials Science. v. 10, p. 111-115. 2015.

RAUPP-PEREIRA, Fabiano. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentíceas**. 2006. 256 f; Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de Aveiro, Portugal.

REPETTE, Wellington L. Concretos para fins especiais e de última geração. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1807-1842.

RIPPER, Ernesto. **Manual prático de materiais de construção**. São Paulo: PINI, 1995. 253 p.

ROHDE, Geraldo Mário. **Quantificação das cinzas de carvão fóssil produzidas no Brasil**. Boletim Técnico (Fundação de ciência e tecnologia). Porto Alegre: CIENTEC, 2016. 40 p.

ROMANO, R. C. O.; MENDES, T. M.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Influência da condição de mistura na dispersão de sílica ativa**. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2006. In: 17º CBECIMat, Foz do Iguaçu, PR.

SBRIGHI, Claudio N. Agregados naturais, britados e artificiais para concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 233-260.

SFB – SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (Brasil). Disponível em: <www.florestal.gov.br>. Acesso em: 19 jan. 2016.

SHERATA, M. H.; THOMAS, M. D. A.; **The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction**. Cement and concrete research. v. 30, n. 7. p. 1063-1072. 2000.

SIDDIQUE, Rafat. **Utilization of wood ash in concrete manufacturing**. Resources, conservation and recycling. v. 67, p. 27-33. 2012.

SILVA, Maristela Gomes da. Cimentos Portland com adições minerais. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia dos materiais**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 761-793.

SILVA, Turibio J. da. Mecanismos de transporte de massa no concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 809-848.

SILVEIRA, Adriana Augustin. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos**. 1996. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (Brasil). Disponível em: < <http://www.snic.org.br> >. Acesso em: 11 fev. 2017.

SOARES, Marcela M. N S. **Determinação da atividade pozolânica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar comparada à sílica amorfa e cristalina**. 2015. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

STRAUCH, Manuel. Gestão de recursos naturais e resíduos. In: STRAUCH, M.; ALBUQUERQUE, P. P. de (Orgs). **Resíduos: como lidar com recursos naturais**. São Leopoldo: Oikos, 2008.

TANGCHIRAPAT, W.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. **Use of palm oil fuel ash as s supplementary cementitious material for producing high strength concrete**. Construction and building materials. v. 23, p. 2641-2646. 2009.

TAYLOR, H. F. W. **The chemistry of cement**. 2. ed. Londres: Thomas Telford, 1997. 459 p.

TOPÇU, İlker. B.; UGURLU, Ali. **Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete**. Cement and concrete research. v. 33; p. 1071-1075, 2003.

UDOEYO, F. F.; INYANG, H.; YOUNG, D. T.; OPARADU, Edmund. E. **Potential of wood waste ash as an additive in concrete**. Journal of materials in civil engineering. v. 18, p. 605-611. 2006.

USGS – U. S. Geological Survey (E.U.A). **Cement statistics and information**. Disponível em:
<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2016-cemen.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2017.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. **An overview of the chemical composition of biomass**. Fuel. v. 89; p. 913-933, 2010.

VASKE, Nei R. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão da lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto**. 2012. 325 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

WINCKLER, José Roberto. **Caracterização física e química de cinza de Pinus spp. Para adição em produtos de cimento Portland: concreto e argamassa**. 2015. 99 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento em parceria com Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2015.